



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

OPTOVLÁKNOVÉ SENZORY NEELEKTRICKÝ VELIČIN

NON-ELECTRICITY QUANTITIES FIBER OPTIC SENSOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kamil Mytyska

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Kamil Mytyska

ID: 155203

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Optovláknové senzory neelektrický veličin

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem diplomové práce je analýza způsobu šíření světla optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami s důrazem na jejich matematický popis pomocí Jonesových a Stokesových vektorů a způsoby zobrazení okamžitého stavu polarizovaného světla na Poincarého kouli. Práce se zabývá okamžitou změnou polarizace světla na základě působení vnějších vlivů, jejich analýzy včetně optimalizace možného uspořádání měřicího pracoviště a jeho realizací. Cílem práce je realizace funkčního senzoru pracujícího na dvou vlnových délkách (635 a 1550 nm).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] COLLETT, E. Field Guide to Polarization, SPIE Vol. FG05, 2005, ISBN: 9780819458681

[2] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku, Brno, CENTA 2009 ISBN: 9788086785141

[3] COLLETT, E. Polarized Light in fiber optics, SPIE, New Jersey 2003, ISBN: 9780819457615

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 24.5.2017

Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá analýzou způsobu šíření světla optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami. Způsob šíření světla je matematicky popsán pomocí Jonesových a Stokesových vektorů. První část práce popisuje vlnovou teorii světla, která je rozdělena na Fresnelovu vlnovou teorii, polarizační elipsu, degenerované polarizační stavy, parametry polarizační elipsy, Poincarého koule a degenerované stavy na Poincarého kouli. Dále následují Stokesovy a Jonesovy polarizační parametry, jejich vektory a Muellerova matice. Dále tato práce znázorňuje princip senzoru teploty, který je proveden za pomoci polarimetru a jeho počítačového programu. Jako následující je zpracován návrh senzoru teploty, který je sestaven z polarizátoru, fotodiody, měřiče světelného výkonu a digitálního multimetru. Další část práce zobrazuje naměřené hodnoty za použití stávajícího řešení měření pomocí polarimetru a navrhnutého senzoru s fotodiódou. Na konec práce je uvedeno porovnání naměřených hodnot pro tři různé teploty, které působily na optické vlákno.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optické vlákno, Fresnelova vlnová teorie, Jonesovy vektory, Stokesovy vektory, fotodioda, senzor teploty

ABSTRACT

This diploma thesis deals with an analysis of the method of propagation of optical fiber by two polarization planes. The method of light propagation is mathematically described using Jones and Stokes vectors. The first part describes wave theory of light divided by Fresnel wave theory, polarization ellipse, degenerate polarization states, parameters of polarization ellipse, Poincaré sphere and degenerated states on Poincaré sphere. Then follows Stokes and Jones polarization parameters, their vectors and Mueller matrix. In addition this paper illustrates the principle of the temperature sensor which is carried out with the help of the polarimeter and its computer program. The following is design of temperature sensor, which is composed of polarizer, photodiode, light output meter and digital multimeter. Another part of the thesis shows the measured values using the current measurement solution using polarimeter and proposed photodiode sensor. At the end of the thesis there is a comparison of the measured values for the three different temperatures that were applied to the optical fiber.

KEYWORDS

Optical fiber, Fresnel Wave Theory, Jones vectors, Stokes vectors, photodiode, temperature sensor

MYTYSKA, K. *Optovláknové senzory neelektrický veličin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 81 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miloslav Filka, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Optovláknové senzory neelektrických veličin“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. a mému konzultantovi Ing. Martinu Kyselákovi, Ph. D. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

.....
podpis autora

OBSAH

Seznam obrázků	x
Seznam tabulek	xii
Úvod	1
1 VLNOVÁ TEORIE SVĚTLA	2
1.1 Fresnelova vlnová teorie	2
1.2 Polarizační elipsa	3
1.3 Degenerované polarizační stavy	4
1.4 Parametry polarizační elipsy	5
1.5 Poincarého koule	6
1.6 Degenerované stavy na Poincarého kouli	7
2 POLARIZACE SVĚTLA	9
2.1 Stokesovy polarizační parametry	9
2.1.1 Stokesovy vektory	10
2.2 Jonesovy polarizační parametry	11
2.2.1 Jonesovy vektory	12
2.3 Muellerova matice	13
3 PRINCIP SENZORU TEPLOTY	14
3.1 Popis stávajícího řešení	14
3.2 Návrh optimalizace teplotního senzoru	20
4 PRAKTICKÁ ČÁST	25
4.1 Měření polarimetrem	25
4.2 Měření pomocí navrhnutého senzoru	32
4.3 Analýza naměřených hodnot	37
5 ZÁVĚR	44
Literatura	46
Seznam symbolů, veličin a zkratk	47
Seznam příloh	48

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Ortogonální systém.....	2
Obr. 1.2: Šíření dvou vln	3
Obr. 1.3: Nestandardní polarizační elipsa.....	4
Obr. 1.4: Poincarého koule	6
Obr. 1.5: Degenerované stavy na Poincarého kouli.....	7
Obr. 1.6: Polarizační stavy.....	8
Obr. 2.1: Šíření polarizovaného paprsku přes polarizační prvek.....	12
Obr. 3.1: Laserová dioda ThorLabs LPS-PM635-FC [6]	14
Obr. 3.2: Schéma stávajícího zapojení.....	15
Obr. 3.3: Zobrazení pootočení vlákna o 45°	16
Obr. 3.4: Polarimetr ThorLabs PAN5710VIS [8].....	17
Obr. 3.5: Zobrazení na Poincarého kouli [8]	18
Obr. 3.6: Lineární vláknový polarizátor Lightcomm 635nm [9].....	20
Obr. 3.7: Návrh schématu zapojení pro optimalizaci teplotního senzoru.....	21
Obr. 3.8: Fotodioda Thorlabs FDS02 [7].....	22
Obr. 3.9: Měřič světelného výkonu ČSAC-ÚRE.....	23
Obr. 3.10: Návrh schématu zapojení pro optimalizaci senzoru s děličem 90:10.....	24
Obr. 4.1: Zapojení pracoviště pro měření polarimetrem	25
Obr. 4.2: TXP Polarimetr – zobrazení na Poincarého kouli	26
Obr. 4.3: Závislost Stokes 2 na čase pro teplotu 27°C.....	27
Obr. 4.4: Závislost stupně polarizace na čase pro teplotu 27°C.....	27
Obr. 4.5: Závislost fázového posunu na čase pro teplotu 27°C	28
Obr. 4.6: Závislost Stokes 2 na čase pro teplotu 17°C.....	29
Obr. 4.7: Závislost stupně polarizace na čase pro teplotu 17°C.....	29
Obr. 4.8: Závislost fázového posunu na čase pro teplotu 17°C	30
Obr. 4.9: Závislost Stokes 2 na čase pro teplotu 37°C.....	31
Obr. 4.10: Závislost stupně polarizace na čase pro teplotu 37°C.....	31
Obr. 4.11: Závislost fázového posunu na čase pro teplotu 37°C	32
Obr. 4.12: Zapojení pracoviště pro měření navrhnutým senzorem	33
Obr. 4.13: Schéma pro zapojení fotodiody	33

Obr. 4.14: Kompaktní laserový diodový řadič Thorlabs CLD1010	34
Obr. 4.15: Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 27°C	35
Obr. 4.16: Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 17°C	36
Obr. 4.17: Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 37°C	37
Obr. 4.18: Závislost Stokes 1, 2 a 3 na čase pro teplotu 27°C	38
Obr. 4.19: Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 27°C	39
Obr. 4.20: Závislost Stokes 3 na čase pro teplotu 27°C	39
Obr. 4.21: Závislost Stokes 1, 2 a 3 na čase pro teplotu 17°C	40
Obr. 4.22: Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 17°C	40
Obr. 4.23: Závislost Stokes 3 na čase pro teplotu 17°C	41
Obr. 4.24: Závislost Stokes 1, 2 a 3 na čase pro teplotu 37°C	41
Obr. 4.25: Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 37°C	42
Obr. 4.26: Závislost Stokes 3 na čase pro teplotu 37°C	42

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1: Specifikace ThorLabs LPS-PM635-FC [6]	14
Tab. 3.2: Specifikace ThorLabs PAN5710VIS [8]	17
Tab. 3.3: Specifikace Lightcomm 635nm [9]	22
Tab. 3.4: Specifikace Thorlabs FDS02 [7]	22

ÚVOD

Cílem této diplomové práce je analýza způsobu šíření světla optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami s důrazem na jejich matematický popis pomocí Jonesových a Stokesových vektorů a způsoby zobrazení okamžitého stavu polarizovaného světla na Poincarého kouli.

Práce je rozdělena do 4 základních kapitol. V první kapitole této práce je popsána vlnová teorie světla. Kapitola je rozdělena na Fresnelovu vlnovou teorii, polarizační elipsu, degenerované polarizační stavy, parametry polarizační elipsy, Poincarého kouli a degenerované stavy na Poincarého kouli.

Následující kapitola popisuje polarizaci světla, kde jsou uvedeny Stokesovy polarizační parametry a jeho vektory. Dále jsou popsány Jonesovy polarizační parametry, vektory a Muellerova matice.

V předposlední kapitole je popsán princip senzoru teploty. První část této kapitoly popisuje stávající řešení měření teploty pomocí polarimetru ThorLabs PAN5710VIS a následné zobrazení na Poincarého kouli v počítačovém programu. Je zde popsáno schéma zapojení, použité součástky, způsob šíření světla vláknem a matematické vyjádření pomocí Jonesových a Stokesových parametrů.

Dále je popsán návrh optimalizace teplotního senzoru. Jsou zde přesně popsány použité součástky a jejich specifikace. Optimalizace teplotního senzoru spočívá v nahrazení polarimetru lineárním polarizátorem, fotodiodou, měřičem světelného výkonu a multimetrem. Tím, že se bude měnit výkon naměřeného světla na fotodiodě, tak budu schopen zjistit, že se změnila teplota.

V poslední kapitole je popsána praktická část měření. V první podkapitole je zobrazen postup měření s použitím polarimetru Thorlabs PAN5710VIS. Jsou zde zobrazeny grafy naměřených hodnot jednotlivých měření a popis vzniklých skutečností.

V druhé podkapitole je uvedeno měření pomocí fotodiody. Měřicí pracoviště je stejné jako v předchozím měření akorát polarimetr je nahrazen polarizátorem, fotodiodou, měřičem světelného výkonu a digitálním multimetrem. Pomocí multimetru je měřen světelný výkon na fotodiodě v závislosti na čase.

Jako poslední je popsána analýza naměřených hodnot. Jedná se o porovnání naměřených hodnot pomocí polarimetru a navrhnutého senzoru. Jsou zde porovnány sestrojené grafy jednotlivých měření při různých teplotách působení na optické vlákno.

1 VLNOVÁ TEORIE SVĚTLA

1.1 Fresnelova vlnová teorie

Kolem roku 1820 Fresnel navrhl teorii světla nyní známou jako Fresnelova vlnová teorie, která zcela vysvětlila tři hlavní jevy světla:

- interferenci,
- difrakci,
- polarizaci.

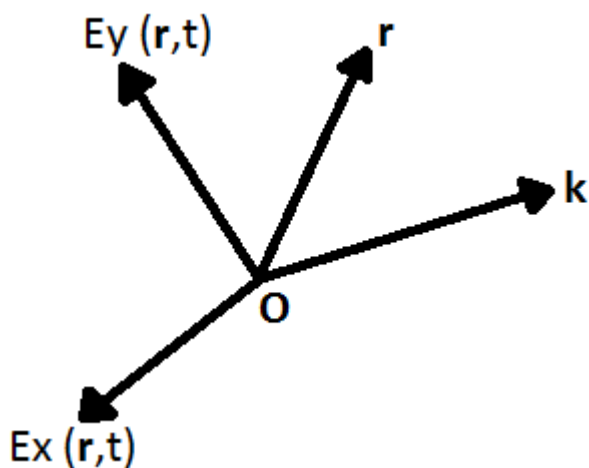
Kromě toho Fresnel a Arago experimentálně ukázaly, že optické pole sestávalo jen ze dvou kolmých složek v rovině příčné ke směru propagace.

Fresnelova vlnová teorie předpokládala, že ortogonální složky byly $u_1(r,t)$ a $u_2(r,t)$, které nazval optickými poruchami. Nyní však víme, že optické poruchy mohou být reprezentovány elektrickým polem složek elektromagnetického pole. Fresnel předpokládal, že složky pole jsou popsány dvěma rovnicemi známými jako vlnové rovnice:

$$\nabla^2 E_x(r, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_x(r, t)}{\partial t^2}, \quad (1.1)$$

$$\nabla^2 E_y(r, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_y(r, t)}{\partial t^2}, \quad (1.2)$$

kde $E_x(r,t)$ a $E_y(r,t)$ jsou opticko-pólové složky, r je poloměr vektoru do určitého bodu v prostoru měřeného od počátku souřadného systému, t je čas, v je rychlost vln a ∇^2 je Laplaceův operátor. Obě složky pole a směr k vytvoří ortogonální systém, který je znázorněn na obr. 1.1.



Obr. 1.1: Ortogonální systém

Řešením vlnových rovnic jsou

$$E_x(r, t) = E_{0x} \cos(\omega t - k \cdot r + \delta_x) \quad (1.3)$$

a

$$E_y(r, t) = E_{0y} \cos(\omega t - k \cdot r + \delta_y), \quad (1.4)$$

kde k je (vektor) vlnové číslo a popisuje směr šíření a r je bod v této oblasti. V praxi je pole převzato a je potřeba ho směřovat podél z -osy. Obě složky výše, mohou být popsán jako

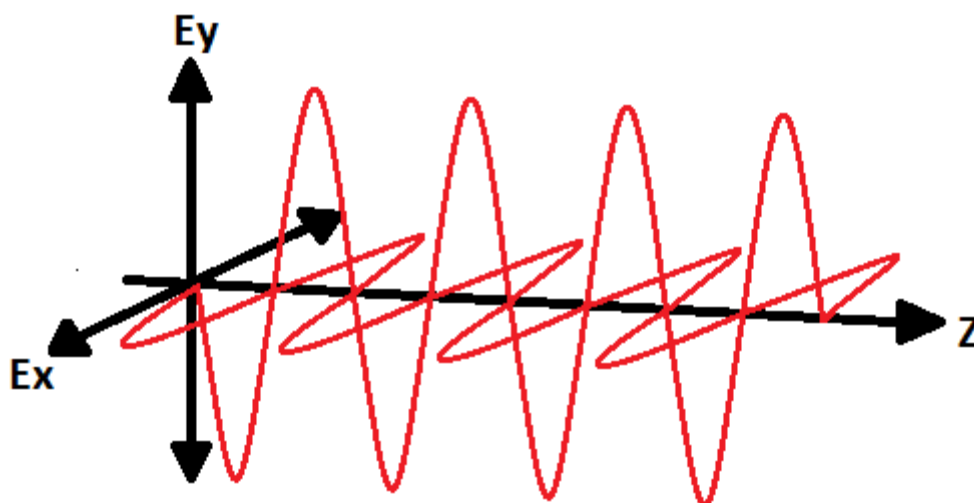
$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x) \quad (1.5)$$

a

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y), \quad (1.6)$$

kde $\omega = 2\pi f$ je úhlová frekvence, $k = 2\pi/\lambda$ je vlna čísla velikosti, E_{0x} a E_{0y} jsou maximální amplitudy, δ_x a δ_y jsou libovolné fáze a pojem $\omega - kz$ se nazývá propagátor.

Šíření těchto dvou vln může být graficky znázorněno, tak jak je zobrazeno na obr. 1.2. Složka E_y je v rovině dopadu a nazývá se složkou p-polarizace. Rovněž složka E_x je kolmá k rovině dopadu a nazývá se složkou s-polarizace [1][3].



Obr. 1.2: Šíření dvou vln

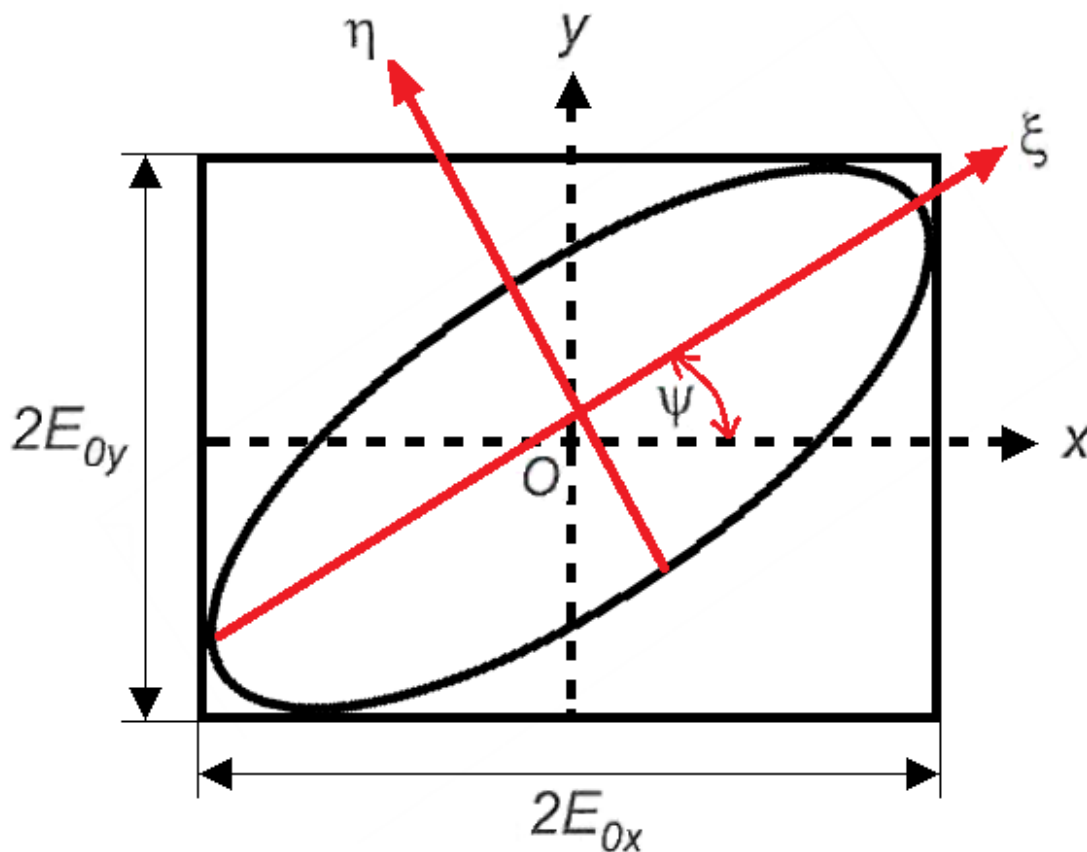
1.2 Polarizační elipsa

Podle Fresnelovy teorie, kde $E_x(r, t)$ a $E_y(r, t)$ popisují sinusové oscilace v x - z a y - z rovinách v pořadí jako je zobrazeno na obr. 1.2. Samy o sobě nejsou tyto rovnice příliš prokazující. Avšak eliminace časoprostor propagátorem $\omega t - kz$ mezi dvěma rovnicemi vede k rovnici elipsy

$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x(z, t)E_y(z, t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta, \quad (1.7)$$

kde $\delta = \delta_y - \delta_x$. Výše uvedená rovnice popisuje elipsu v její nestandardní formě.

Vzhledem k tomu, že se rovnice odkazuje na polarizované světlo, tak se rovnice nazývá polarizační elipsa. V rovnici byl časoprostorový propagátor jednoznačně vyloučen. Nicméně složky pole $E_x(z,t)$ a $E_y(z,t)$ jsou nadále časoprostorově závislé. Graf nestandardní polarizační elipsy je zobrazen na obr. 1.3.



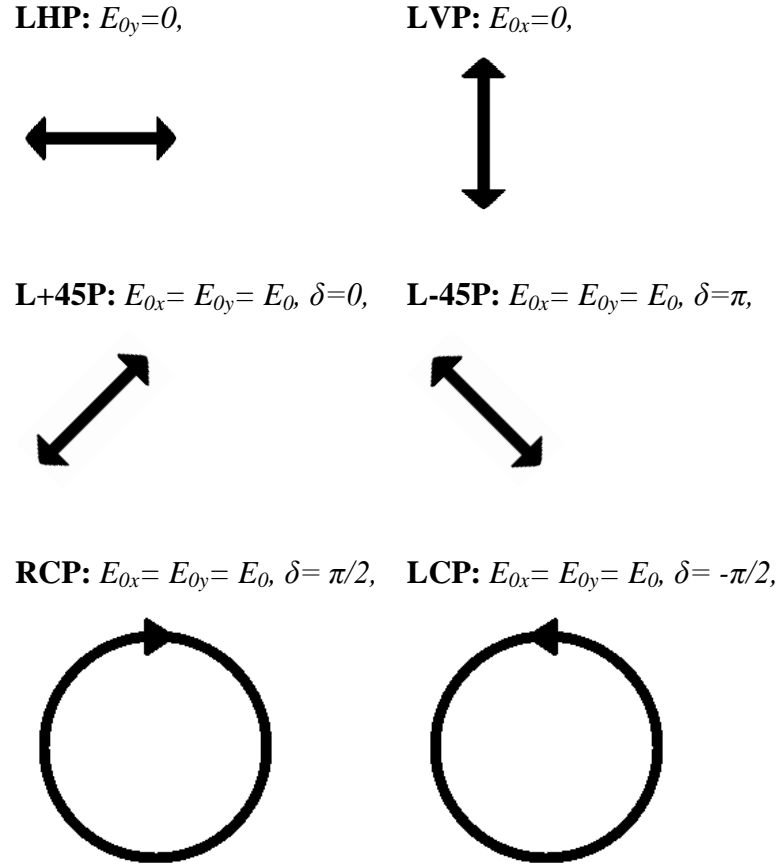
Obr. 1.3: Nestandardní polarizační elipsa

1.3 Degenerované polarizační stavy

Obecně platí, že optické pole je elipticky polarizované, ale existuje několik kombinací amplitudy a fáze, které jsou obzvláště důležité. Jedná se o takzvané degenerované polarizační stavy:

- lineárně horizontálně / vertikálně polarizované světlo (LHP / LVP),
- lineárně $\pm 45^\circ$ polarizované světlo (L + 45P / L - 45P),
- vpravo / vlevo kruhově polarizované světlo (RCP / LCP).

Polarizační stavy spolu s matematickými podmínkami a srovnávacími údaji (polarizační elipsy) jsou zobrazeny na následujících zobrazeních.



RCP světlo se otáčí ve směru hodinových ručiček a LCP se otáčí proti směru hodinových ručiček při šíření směrem k pozorovateli.

Tyto polarizační stavy jsou důležité, protože je možné je relativně snadno vytvořit v laboratoři za použití lineárních a kruhových polarizátorů. Měření polarizace stejně jako mnoho polarizačních výpočtů je značně zjednodušeno pomocí těchto specifických polarizačních stavů. To platí zejména tehdy, když polarizovaný paprsek se šíří přes četné polarizační prvky [1][3].

1.4 Parametry polarizační elipsy

Polarizační elipsa může být vyjádřena z hlediska dvou úhlových parametrů:

- úhel orientace ψ ($0 \leq \psi \leq \pi$),
- eliptický úhel χ ($-\pi/4 < \chi \leq \pi/4$).

Tyto úhly mohou být definovány, pokud jde o parametry polarizace elipsy:

$$\tan 2\psi = \frac{2E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \cos \delta, \quad 0 \leq \psi \leq \pi \quad (1.8)$$

a

$$\sin 2\chi = \frac{2E_{0x}E_{0y} \sin \delta}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2}, \quad -\pi/4 < \chi \leq \pi/4. \quad (1.9)$$

Pravé strany obou rovnic se skládají z algebraických a trigonometrických výrazů. Tyto dvě rovnice mohou být zcela přepsány v trigonometrických podmínkách zavedením úhlu známého jako pomocný úhel α definovaný podle

$$\tan \alpha = \frac{E_{0y}}{E_{0x}}, \quad 0 \leq \alpha \leq \pi/2. \quad (1.10)$$

To vede k čistě trigonometrickým rovnicím

$$\tan 2\psi = (\tan 2\alpha) \cos \delta \quad (1.11)$$

a

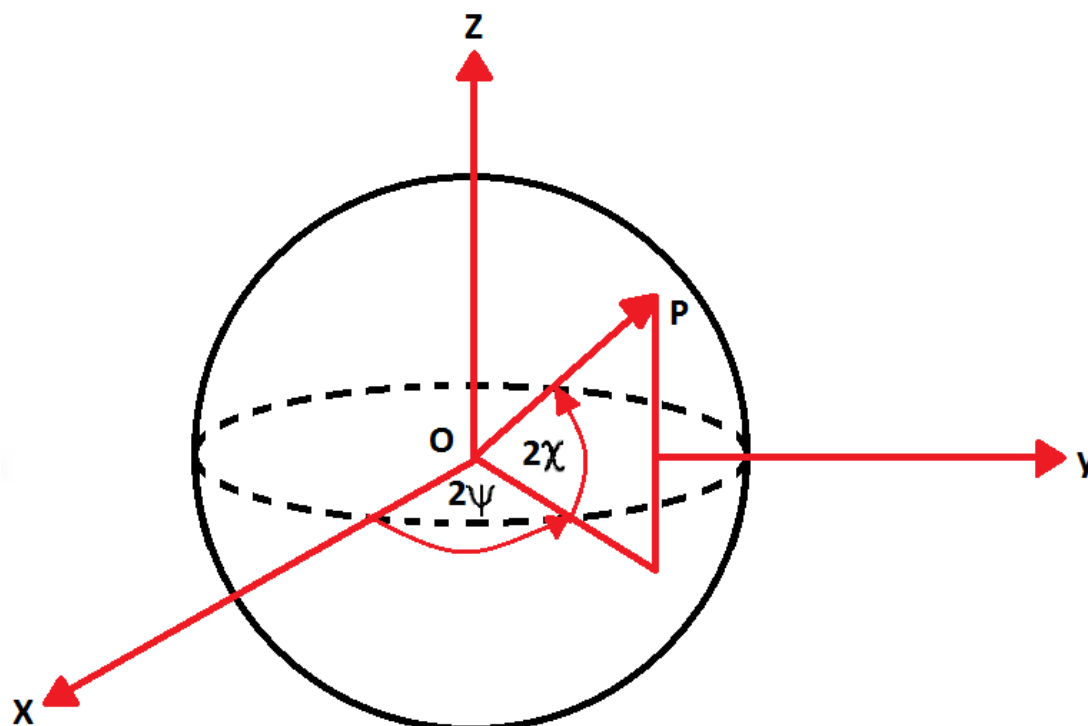
$$\sin 2\chi = (\sin 2\alpha) \sin \delta. \quad (1.12)$$

Podmínky na úhly jsou $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ a $0 \leq \delta \leq 2\pi$.

1.5 Poincarého koule

Polarizace elipsy je výborný způsob, jak představit polarizované světlo. Nicméně s výjimkou degenerovaných polarizačních stavů je prakticky nemožné určit orientaci a eliptičnost pozorovacích úhlů polarizační elipsy. Kromě toho výpočty potřebné ke stanovení nových úhlů polarizovaného paprsku, který se šíří prostřednictvím jednoho nebo více polarizačních prvků jsou obtížné a zdlouhavé.

Za účelem překonání těchto obtíží Poincaré (1892) navrhl použití koule nyní známé jako Poincarého koule, která reprezentuje polarizované světlo. Následující obrázek (obr. 1.4) ukazuje Poincarého kouli a její sférické a Kartézské souřadnice.



Obr. 1.4: Poincarého koule

Zde x , y , a z jsou kartézské souřadné osy, ψ a χ jsou sférické orientace a eliptické úhly (polarizační elipsy) a P je bod na povrchu koule. Na kouli jsou úhly vyjádřeny jako 2ψ a 2χ . Pro jednotku koule Kartézských souřadnic jsou spojeny do sférických souřadnic rovnice.

$$x = \cos(2\chi)\cos(2\psi), \quad 0 \leq \psi < \pi, \quad (1.13)$$

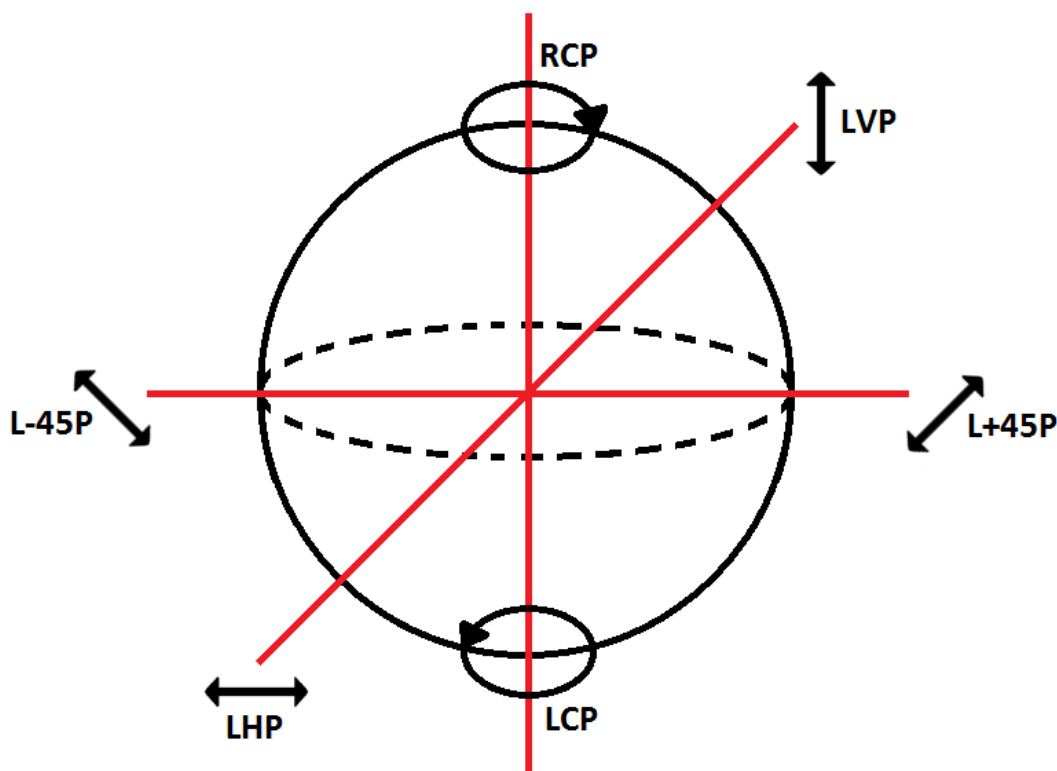
$$y = \cos(2\chi)\sin(2\psi), \quad -\pi/4 < \chi \leq \pi/4, \quad (1.14)$$

$$z = \sin(2\chi), \quad (1.15)$$

kde $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ pro kouli o poloměru jednotky.

1.6 Degenerované stavy na Poincarého kouli

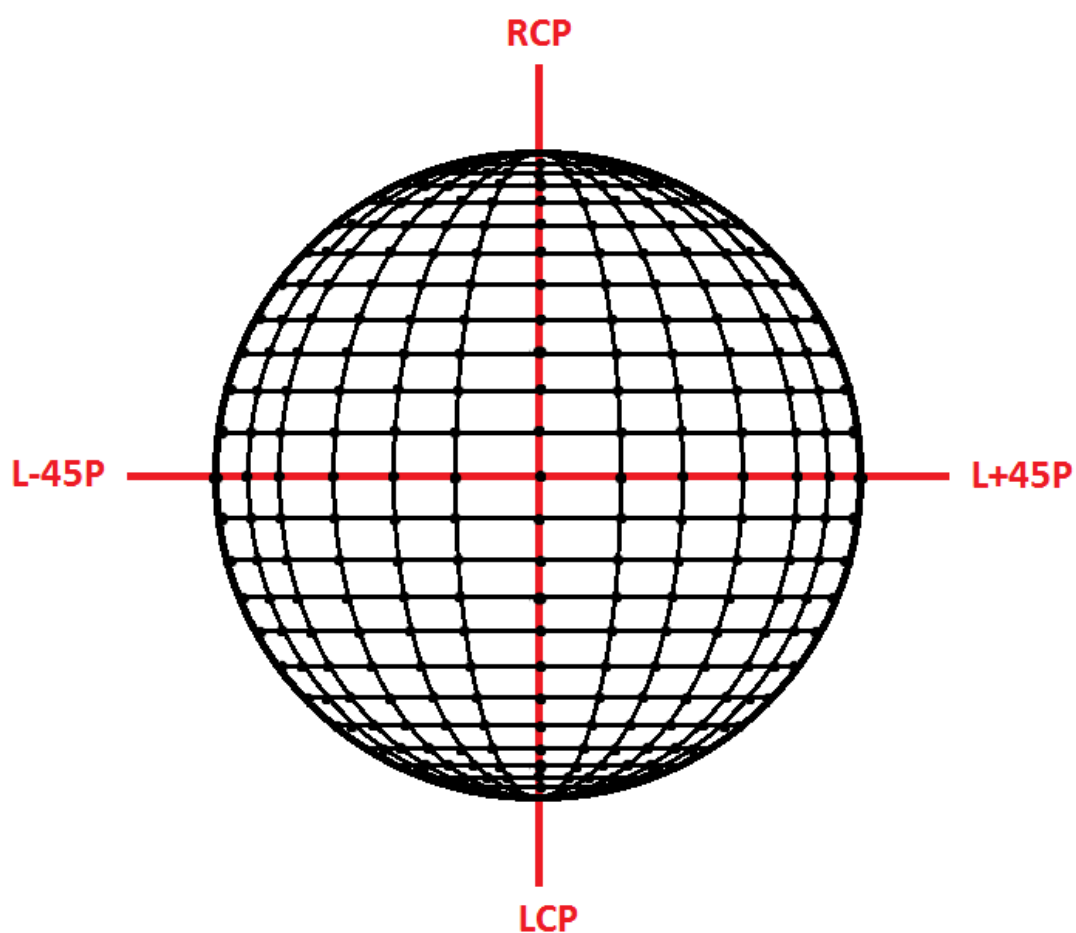
Z předchozích rovnic jakýkoli stav polarizace může být reprezentován dvojicí souřadnic $(2\psi, 2\chi)$. Tyto degenerované polarizační stavy na Poincarého kouli jsou určeny pro LHP $(0^\circ, 0^\circ)$, pro L+45P $(+90^\circ, 0^\circ)$, pro LVP $(180^\circ, 0^\circ)$, pro L-45P $(270^\circ, 0^\circ)$, pro RCP $(0^\circ, +90^\circ)$ a pro LCP $(0^\circ, -90^\circ)$. Tyto degenerované stavy na x , y a z ose jsou uvedeny na obr. 1.5.



Obr. 1.5: Degenerované stavy na Poincarého kouli

Všechny lineární polarizační stavy leží na rovníku. Pravé a levé kruhové polarizační stavy jsou na severním a jižním pólu. Respektive elipticky polarizované stavy jsou zastoupeny všude jinde na povrchu koule.

Na obr. 1.6 jsou ukázány polarizační stavy vynesené v každém průsečíku $7,5^\circ$ zeměpisné šířky a 15° rovnoběžek [1][3].



Obr. 1.6: Polarizační stavy

2 POLARIZACE SVĚTLA

2.1 Stokesovy polarizační parametry

Nejzávažnější omezení na Poincarého kouli a na polarizační elipsy jsou

- polarizace elipsy jsou okamžitě reprezentovány polarizovaným světlem,
- ani úhel natočení ψ , ani eliptický úhel χ není přímo měřitelný.

Za účelem překonání těchto omezení je nezbytné určit měřitelné polarizované pole. To může být provedeno pomocí časového průměru polarizační elipsy:

$$\frac{E_x(z,t)^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y(z,t)^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x(z,t)E_y(z,t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos\delta = \sin^2\delta. \quad (2.1)$$

Průměrná doba $\langle E_i(z, t)E_j(z, t) \rangle$ je definována

$$\langle E_i(z, t)E_j(z, t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E_i(z, t)E_j(z, t)dt, \quad i, j = x, y, \quad (2.2)$$

kde T je celková průměrná doba. Aplikací časově průměrné definice na polarizační elipsu získáme následující rovnice:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2, \quad (2.3)$$

kde

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2, \quad (2.4)$$

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2, \quad (2.5)$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y}\cos\delta, \quad (2.6)$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y}\sin\delta, \quad \delta = \delta_y - \delta_x. \quad (2.7)$$

Parametry S_0 , S_1 , S_2 a S_3 jsou pozorovatelná polarizovaná pole. Byly zavedeny Stokes (1852) a nazývají se Stokesovy polarizační parametry.

První Stokesův parametr S_0 popisuje celkovou intenzitu optického paprsku. Druhý parametr S_1 popisuje převahu LHP světla nad LVP světlem. Třetí parametr S_2 popisuje převahu L+45P světla nad L-45P světlem a parametr S_3 popisuje převahu RCP světla nad LCP světlem.

Stokesovy parametry mohou být vyjádřeny v komplexním zápisu (s cílem obejít formálně časovou integraci) potlačením propagátoru a zapsané jako

$$E_x(t) = E_{0x}\exp(i\delta_x), \quad (2.8)$$

$$E_y(t) = E_{0y}\exp(i\delta_y). \quad (2.9)$$

Tyto parametry jsou pak definovány v komplexním zápisu následujícími rovnicemi:

$$S_0 = E_x E_x^* + E_y E_y^*, \quad (2.10)$$

$$S_1 = E_x E_x^* - E_y E_y^*, \quad (2.11)$$

$$S_2 = E_x E_y^* + E_y E_x^*, \quad (2.12)$$

$$S_3 = i(E_x E_y^* - E_y E_x^*), \quad (2.13)$$

kde $i = \sqrt{-1}$ a * představuje komplexně sdružené číslo.

2.1.1 Stokesovy vektory

Čtyři Stokesovy parametry mohou být uspořádány ve sloupci matice a jsou zapsány ve tvaru

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}. \quad (2.14)$$

Matematicky to není vektor, ale v běžném používání se nazývá vektor. Tato rovnice by se měla správně nazývat Stokesův sloupec matice. Stokesův vektor pro elipticky polarizované světlo (ELP) je pak reprezentován

$$S = \begin{pmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y}\cos\delta \\ 2E_{0x}E_{0y}\sin\delta \end{pmatrix}. \quad (2.15)$$

Rovnice (2.15) je Stokesův vektor pro rovinné vlny. Stokesovy vektory pro šest degenerovaných polarizačních stavů jsou tyto následující:

Lineárně horizontálně polarizované světlo (LHP): $E_{0y}=0$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.16)$$

kde $I_0=E_{0x}^2$ je celková intenzita.

Lineárně vertikálně polarizované světlo (LVP): $E_{0x}=0$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.17)$$

kde $I_0=E_{0y}^2$ je celková intenzita.

Lineárně +45° polarizované světlo (L+45P): $E_{0x}=E_{0y}, \delta=0$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.18)$$

kde $I_0=2E_0^2$ je celková intenzita.

Lineárně -45° polarizované světlo (L-45P): $E_{0x} = E_{0y}, \delta = \pi$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.19)$$

kde $I_0 = 2E_0^2$ je celková intenzita.

Vpravo kruhově polarizované světlo (RCP): $E_{0x} = E_{0y}, \delta = \pi/2$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.20)$$

Vlevo kruhově polarizované světlo (LCP): $E_{0x} = E_{0y}, \delta = 3\pi/2$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}. \quad (2.21)$$

kde $I_0 = 2E_0^2$ je celková intenzita v (2.20) a (2.21).

Stokesovy parametry polarizace mohou být také vyjádřeny z hlediska otáčení a eliptičnosti úhlů polarizace elipsy ψ a χ spojené s Poincarého koulí takto [1][3]:

$$S_1 = S_0 \cos(2\chi) \cos(2\psi), \quad (2.22)$$

$$S_2 = S_0 \cos(2\chi) \sin(2\psi), \quad (2.23)$$

$$S_3 = S_0 \sin(2\chi), \quad (2.24)$$

a

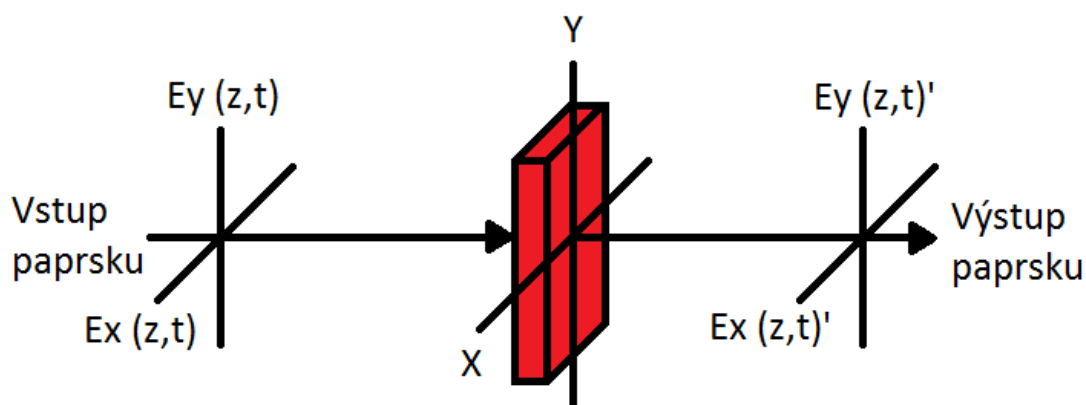
$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{S_2}{S_1} \right), \quad 0 \leq \psi < \pi, \quad (2.25)$$

$$\chi = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{S_3}{S_0} \right), \quad -\pi/4 < \chi \leq \pi/4. \quad (2.26)$$

2.2 Jonesovy polarizační parametry

Jonesův maticový počet je formulace matice polarizovaného světla, která se skládá z 2x1 Jonesových vektorů sloužících k popisu složek pole a 2x2 matic popisující polarizační prvky. Zatímco formulace 2x2 je jednodušší než Muellerovi matice, která je formulována Jonesovou formulací omezenou na zpracování pouze zcela polarizovaného světla. Tím pádem se nedá popsat nepolarizované nebo částečně polarizované světlo.

Jonesova formulace se používá při zpracování interferenčních jevů nebo problémů, kdy pole amplitudy musí být překrýváno. Polarizovaný paprsek se šíří přes polarizační prvek (obr. 2.1).



Obr. 2.1: Šíření polarizovaného paprsku přes polarizační prvek

Jonesův sloupec matice 2x1 nebo vektor pro pole je

$$E = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\delta_x} \\ E_{0y} e^{i\delta_y} \end{pmatrix}, \quad (2.27)$$

kde E_{0x} a E_{0y} jsou amplitudy, δ_x a δ_y jsou fáze a $i = \sqrt{-1}$. Složky E_x a E_y jsou komplexní veličiny. Důležitou operací v Jonesově počtu je určit intenzitu I :

$$I = (E_x^* \ E_y^*) \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = E_x E_x^* + E_y E_y^*. \quad (2.28)$$

Řádek matice je komplexní transponované $^+$ ze sloupce matice, takže může být formálně zapsán jako

$$I = E^+ \cdot E. \quad (2.29)$$

Je obvyklé standardizovat $I=1$.

2.2.1 Jonesovy vektory

Lineárně horizontálně polarizované světlo (LHP): $E_y=0$.

$$E_{LHP} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{j\delta_x} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2.30)$$

Ze stavu normalizace vidíme, že $E_{0x}^2=1$. To znamená, že normalizovaný Jonesův vektor pro LHP světlo je zapsán jako

$$E_{LHP} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2.31)$$

Lineárně vertikálně polarizované světlo (LVP): $E_x=0$.

$$E_{LVP} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.32)$$

Lineárně +45° polarizované světlo (L+45P): $E_x = E_y$, tak $2E_{0x}^2=1$.

$$E_{L+45P} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.33)$$

Lineárně -45° polarizované světlo (L-45P): $E_x = -E_y$, tak $2E_{0x}^2 = I$.

$$E_{L-45P} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}. \quad (2.34)$$

Vpravo kruhově polarizované světlo (RCP): Pro tento případ $E_{0x} = E_{0y}$ a $\delta_y - \delta_x = \pi/2$. Pak $2E_{0x}^2 = I$ a máme

$$E_{RCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix}. \quad (2.35)$$

Vlevo kruhově polarizované světlo (LCP): Pro tento případ $E_{0x} = E_{0y}$ a $\delta_y - \delta_x = -\pi/2$. Pak $2E_{0x}^2 = I$ a máme

$$E_{LCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -j \end{pmatrix}. \quad (2.36)$$

2.3 Muellerova matice

Obecně platí, že polarizace elipsy je v nestandardním formě. Polarizace elipsy může být upravena změnou amplitudy, fáze nebo otáčením elipsy. Polarizační materiály jsou k dispozici, jak toho dosáhnout. Polarizovaný paprsek s daným polarizačním stavem se šíří prostřednictvím jednoho nebo více polarizačních prvků, kde paprsek získá nový polarizační stav.

Vstupní paprsek se vyznačuje Stokesovým vektorem S a výstupním paprskem S' . Předpokládá se, že S a S' jsou lineární vztahy vytvořené pomocí 4x4 transformační matice známé jako Muellerova matice, což představuje polarizační prvek:

$$\begin{pmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

Všechny prvky v 4x4 Muellerově matici jsou skutečné veličiny. Výše uvedená matice může být zapsána jako rovnici matice

$$S' = M \cdot S. \quad (2.38)$$

Pouze dva polarizační prvky jsou potřeba pro změnu tří parametrů elipsy (ortogonální amplitudy a fáze). Amplituda může být změněna použitím polarizačního prvku známého jako polarizátor. Podobně lze měnit fázi optického paprsku pomocí vlnové desky (nazývaný také jako retardér nebo fázový posun). Polarizační elipsu lze měnit otáčením pomocí součásti nazývané rotátor. Pomocí těchto tří polarizačních prvků je možné získat jakýkoli eliptický polarizovaný stav [1][3].

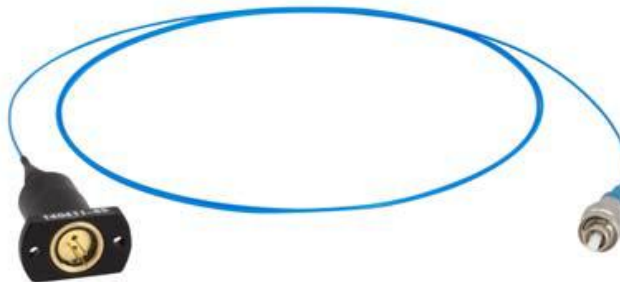
3 PRINCIP SENZORU TEPLOTY

3.1 Popis stávajícího řešení

Stávající zapojení je řešeno způsobem zobrazeném na obr. 3.2.

Na začátku celého zapojení máme zdroj ke kterému je připojena laserová dioda ThorLabs LPS-PM635-FC viz obr. 3.1. Specifikace této diody je uvedena v tab. 3.1.

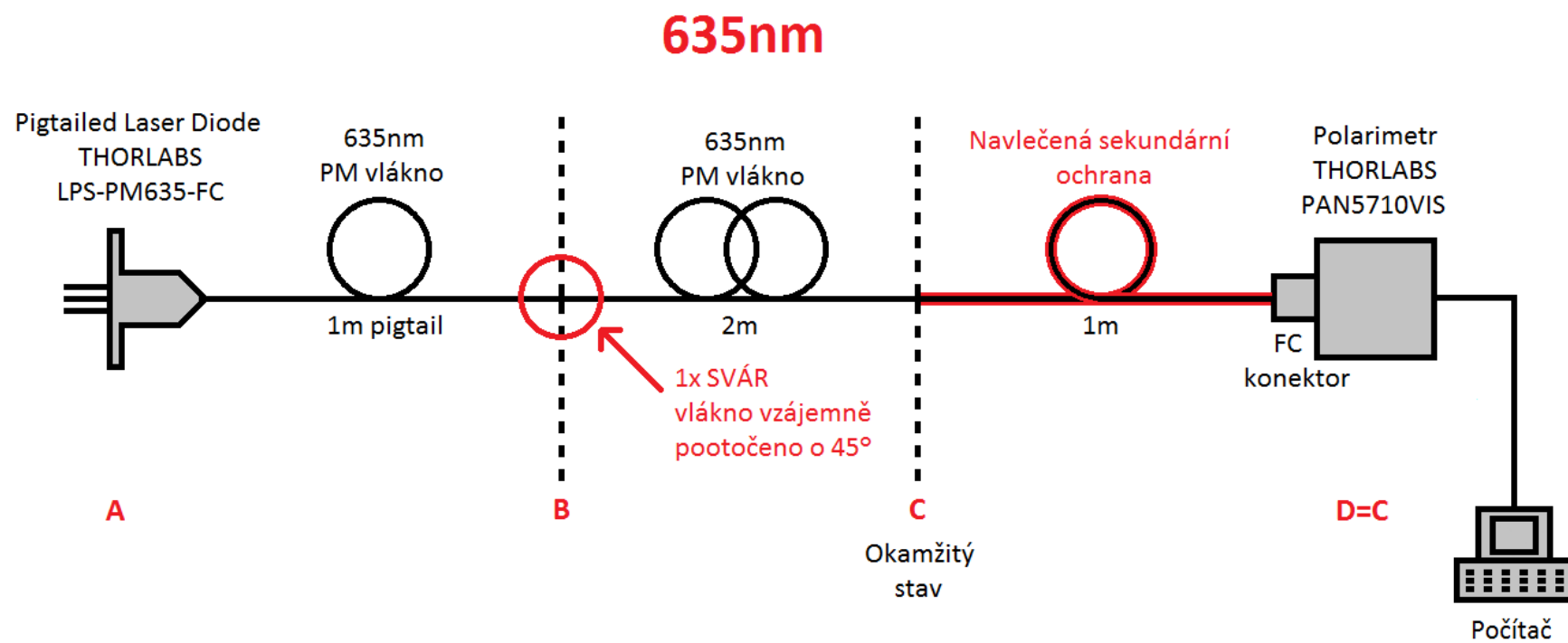
Jedná se o Panda vlákno, kterým se šíří lineárně polarizované světlo. V tomto vlákně je intenzita pouze v pomalé ose S (slow).



Obr. 3.1: Laserová dioda ThorLabs LPS-PM635-FC [6]

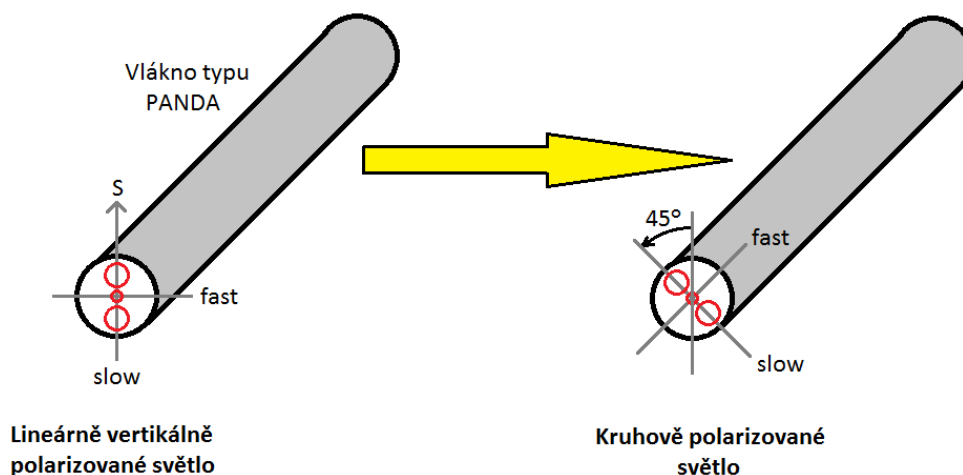
Tab. 3.1: Specifikace ThorLabs LPS-PM635-FC [6]

Specifikace	
LD Reverzní napětí (Max)	2 V
PD Reverzní napětí (Max)	30 V
Výkon optického výstupu	2,5 mW
Provozní teplota	0 až 50 °C
Skladovací teplota	-10 až 65 °C
Pin kód	9 A
Laserová diody	HL6320G
Vlákno	PM630-HP
Konektor	FC



Obr. 3.2: Schéma stávajícího zapojení

Po 1 metru vlákna následuje svár, kde jsou vlákna vzájemně pootočená o 45° . Lineárně vertikálně polarizovaným světlem svítím mezi pomalou a rychlou osu (slow a fast) a tím, že svítím přesně mezi pomalou a rychlou osu, tak je vybudím obě stejně a získám kruhově polarizované světlo. Toto je zobrazeno na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Zobrazení pootočení vlákna o 45°

Dále následují 2 metry senzorického PM vlákna 635nm bez sekundární ochrany (primární vlákno). Tyto 2 metry vlákna jsou odstíněny polystyrénovými deskami a potravinářskou fólií, aby nemohl kolem vlákna proudit teplý nebo studený vzduch a tím ovlivňovat měření. Toto vlákno je o 45° pootočené a tím vznikne kruhově polarizované světlo. Kruhová polarizace se začne měnit, když budu na vlákno působit nějakou teplotou T . To znamená, že se nebudou zmenšovat intenzity, ale budou se posunovat v čase.

V případě teplotního působení na 2 metrové vlákno bez ochrany dojde k dvojlomu. Mám kruhově polarizované světlo a tím mám rovnoměrně vybuzené obě polarizační roviny. Tím pádem mám výkonově stejně velkou složku na obou rovinách a sinusovky se mi budou navzájem zpožďovat, jak na ně budu teplotně působit. Okamžitý stav se mi bude měnit v závislosti na teplotním působení na vlákno. Stav D se bude rovnat stavu C.

Vlákno pokračuje 1 metrem vlákna s navlečenou sekundární ochranou a je zakončeno FC konektorem a polarimetrem s výstupem do počítače.

Sin1 a Sin2 a jejich vektorový součet je 45° a je někde mezi horizontálně a vertikálně polarizovaným světlem. Polarimetrem vidím pouze vektorový součet, nevidím složky horizontálně a vertikálně polarizovaného světla.

Polarimetr je zařízení, které je schopné online ukázat v jakém stavu se momentálně nachází polarizace. Polarimetr ThorLabs PAN5710VIS mám zobrazen na obr. 3.4 a jeho specifikaci v tab. 3.2.

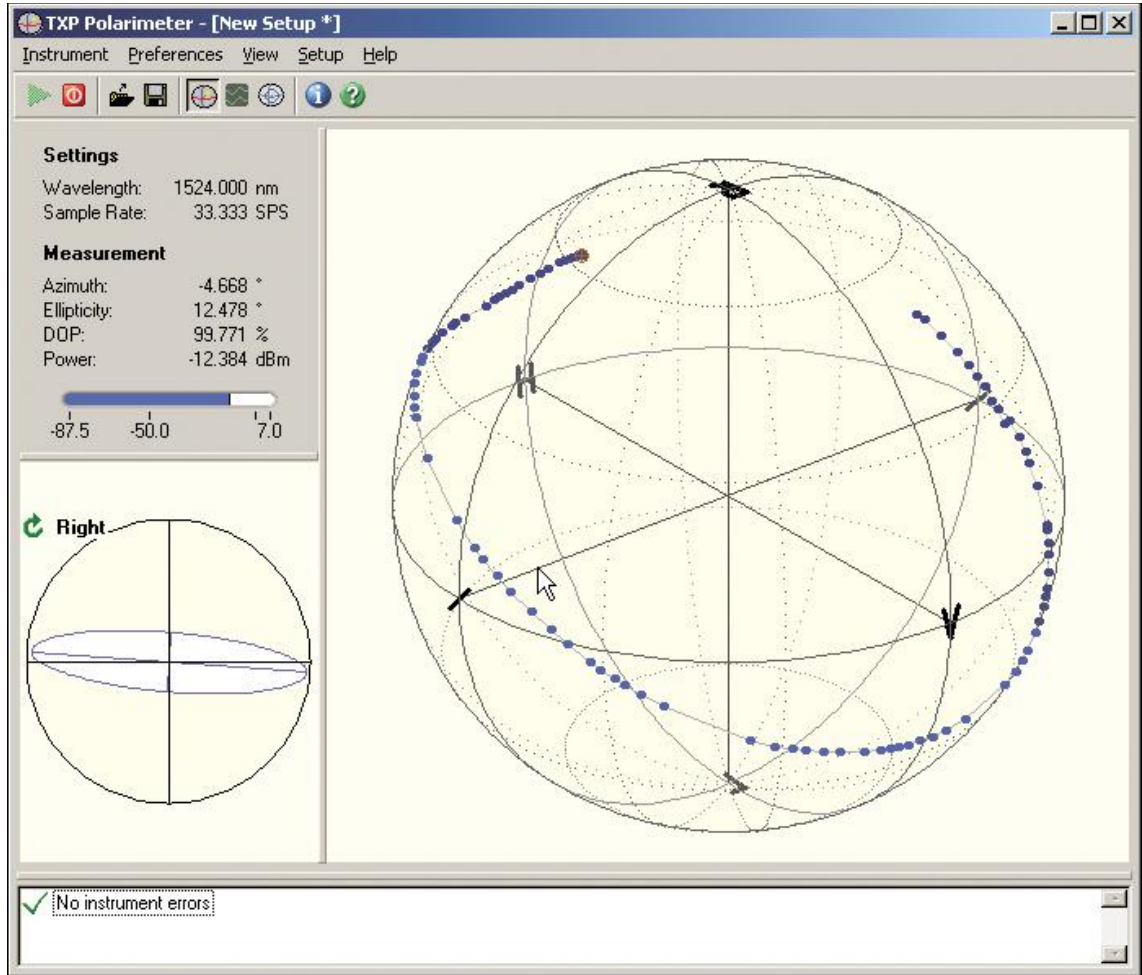


Obr. 3.4: Polarimetr ThorLabs PAN5710VIS [8]

Tab. 3.2: Specifikace ThorLabs PAN5710VIS [8]

Specifikace	
Rozsah vstupního napětí	-60 dBm až 10 dBm
Azimutový úhel přesnost	0,2°
Eliptický úhel přesnost	0,2°
Normovaná Stokes přesnost	s1, s2, s3 < 0.005
Stupeň polarizace přesnost	±0.5%
Rozsah vlnových délek	VIS: 400 až 700 nm IR1: 700 až 1000nm IR2: 1000 až 1350 nm IR3: 1350 až 1700 nm
Maximální rychlost měření	333 Samples/s
Vstup vlákna	FC / PC
Volný vstupní prostor	Ø 3 mm, < 3 mrad odchylky paprsku
Analogové rozhraní (přes čelní panel D-Sub)	Výstupy: s1, s2, s3, Power / dBm, DOP (kompletní Stokesovy vektory + DOP) Vstupy: Trigger
Digitální rozhraní	Výstupy: s1, s2, s3, Power, DOP, azimut a eliptičnost
Zahřívací doba na jmenovitou přesnost	15 min.
Provozní teplota	5 až 35 °C

V programu TXP Polarimetr online vidím na Poincarého kouli jak je světlo v určitém okamžiku polarizováno. Dále vidíme Stokes 1, 2 a 3 a jak se každý mění působením teploty na vlákno. Stokes nabývá hodnot od -1 do +1. V programu je vidět vykreslení na Poicarého kouli, které se liší podle působení teploty. Výstup z tohoto programu je zobrazen na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Zobrazení na Poincarého kouli [8]

Tuto soustavu mohu popsat Jonesovými vektory a maticemi:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{pmatrix} \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{i\delta} + 1 & e^{i\delta} - 1 \\ e^{i\delta} - 1 & e^{i\delta} + 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix} = \quad (3.1)$$

$$= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\delta} (\cos \beta + \sin \beta) & e^{i\delta} (\cos \beta - \sin \beta) \\ e^{i\delta} (\cos \beta + \sin \beta) & e^{i\delta} (\cos \beta - \sin \beta) \end{pmatrix}.$$

Koherentní matice před polarizátorem je

$$J_L = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \cos 2\beta \cos \delta & \sin 2\beta + i \cos 2\beta \sin \delta \\ \sin 2\beta + i \cos 2\beta \sin \delta & 1 - \cos 2\beta \cos \delta \end{pmatrix}. \quad (3.2)$$

Hodnoty Stokesových parametrů jsou

$$S_1 = \cos 2\beta \cos \delta, \quad (3.3)$$

$$S_2 = \sin 2\beta, \quad (3.4)$$

$$S_3 = \cos 2\beta \sin \delta. \quad (3.5)$$

V případě, kdy bude vlákno otočeno přesně o 45° tj. $\pi/4$ a vstupní intenzita bude $\beta=0$, tak Stokesovy parametry budou

$$S_1 = \cos \delta, \quad (3.6)$$

$$S_2 = 0, \quad (3.7)$$

$$S_3 = \sin \delta. \quad (3.8)$$

Výše uvedený případ odpovídá mému zapojení při měření optického vlákna polarimetrem.

Na výstupu bude výsledná intenzita optické vlny

$$I = \frac{1}{2}(1 + \sin 2\theta \sin 2\beta + \cos 2\theta \cos 2\beta \cos \delta). \quad (3.9)$$

Koherentní matice bude mít tvar

$$J = I \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{pmatrix}. \quad (3.10)$$

V našem případě, kdy je $\theta=\pi/4$ a $\beta=\pi/4$ je intenzita rovna

$$I = \left(\theta = \frac{\pi}{4}, \beta = \frac{\pi}{4} \right) = \frac{1}{2}(1 + \cos \delta), \quad (3.11)$$

kde I je intenzita definovaná vztahem (2.10 – 2.13).

Hodnoty Stokesových parametrů jsou

$$S_1 = I \cos 2\theta, \quad (3.12)$$

$$S_2 = 0, \quad (3.13)$$

$$S_3 = 0. \quad (3.14)$$

Rozsah hodnot intenzity na výstupu odpovídá hodnotě $\cos \delta=\pm I$. Když toto dosadím do rovnice (3.9) a rovnici upravím, tak dostanu

pro $\cos \delta=+I$

$$I_{max} = \cos^2(\theta - \beta) \quad (3.15)$$

a pro $\cos \delta=-I$

$$I_{min} = \cos^2(\theta + \beta). \quad (3.16)$$

Střední hodnota intenzity bude na výstupu rovna

$$I_c = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} = \frac{1}{2}(\cos^2(\theta - \beta) + \cos^2(\theta + \beta)). \quad (3.17)$$

Toto zapojení jsem využil k návrhu optimalizace teplotního senzoru v nadcházejících kapitolách [1][3].

3.2 Návrh optimalizace teplotního senzoru

K optimalizaci stávajícího řešení teplotního senzoru potřebuji senzor, který si mohu vzít kamkoli s sebou. To znamená, že stávající řešení potřebuji miniaturizovat. Problémem je polarimetr, který je velmi drahý a tudíž není vhodný k přenášení.

Mám světlo jehož intenzita je v obou osách stejná, ale v ose 45° se vektorový součet mění a je v čase různý (Stokes 2). V případě, že si z toho vyberu pouze Stokes 2, což je intenzita světla v původní rovině 45° a zařadím lineární polarizátor, který mně propustí z 360° jenom jeden požadovaný úhel to je 45° . Když propustím jenom požadovaný úhel a budu měřit jenom jeho intenzitu na fotodiodě, tak dostanu Stokes 2.

Po přiložení tělesa, kterým bude teplotně působit na vlákno bez ochrany se mi začne světlo ve vlákne natačet.

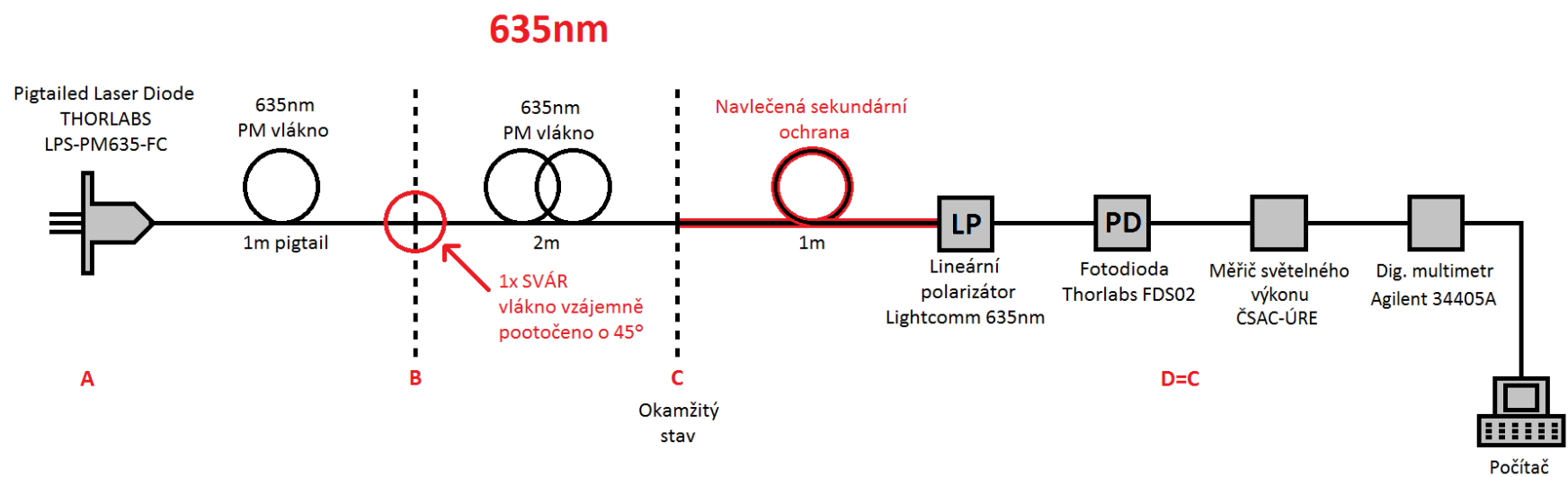
Tím, že se bude měnit výkon naměřeného světla na fotodiodě, tak budu schopen zjistit, že se změnila teplota. Řešením teplotního senzoru bude zapojení lineárního vláknového polarizátoru, fotodiody, měřiče světelného výkonu a digitálního multimetru. Toto zapojení je zobrazeno na Obr. 3.7.

Schéma zapojení je téměř totožné s původním zapojením akorát polarimetr je nahrazen lineárním polarizátorem, fotodiodou, měřičem světelného výkonu a multimetrem.

Lineární vláknový polarizátor Lightcomm 635nm propustí jenom jednu rovinu. Tím, že ho natočím na 45° , tak si z toho vyberu pouze vektorový součet a ten se bude v čase měnit, pokud budu na vlákno působit nějakou teplotou. Tento polarizátor je zobrazen na obr. 3.6 a jeho specifikace je uvedena v tab. 3.3.



Obr. 3.6: Lineární vláknový polarizátor Lightcomm 635nm [9]



Obr. 3.7: Návrh schématu zapojení pro optimalizaci teplotního senzoru

Tab. 3.3: Specifikace Lightcomm 635nm [9]

Specifikace	
Vlnová délka	630 nm
Provozní šířka pásma	± 20 nm
Vložný útlum	$\leq 1,3$ dB
Poměr zániku	≥ 24 dB
Útlum odrazu	≥ 50 dB
Typ vlákna	Volba1: PMF-PMF Volba2: SMF-PMF Volba2: SMF-SMF
Výkonová manipulace	≤ 300 mW
Provozní teplota	-5 až 70 °C
Skladovací teplota	-40 až 85 °C
Rozměry	$\Phi 5,5 \times L35$ nebo $\Phi 3,0 \times L25$

Za lineární polarizátor zapojím fotodiodu, která je citlivá na dopadající světlo. Použiji fotodiodu Thorlabs FDS02, která je velmi rychlá a citlivá. Na obr. 3.8 je vidět jak tato fotodioda vypadá a v tab. 3.4 je její specifikace.



Obr. 3.8: Fotodioda Thorlabs FDS02 [7]

Tab. 3.4: Specifikace Thorlabs FDS02 [7]

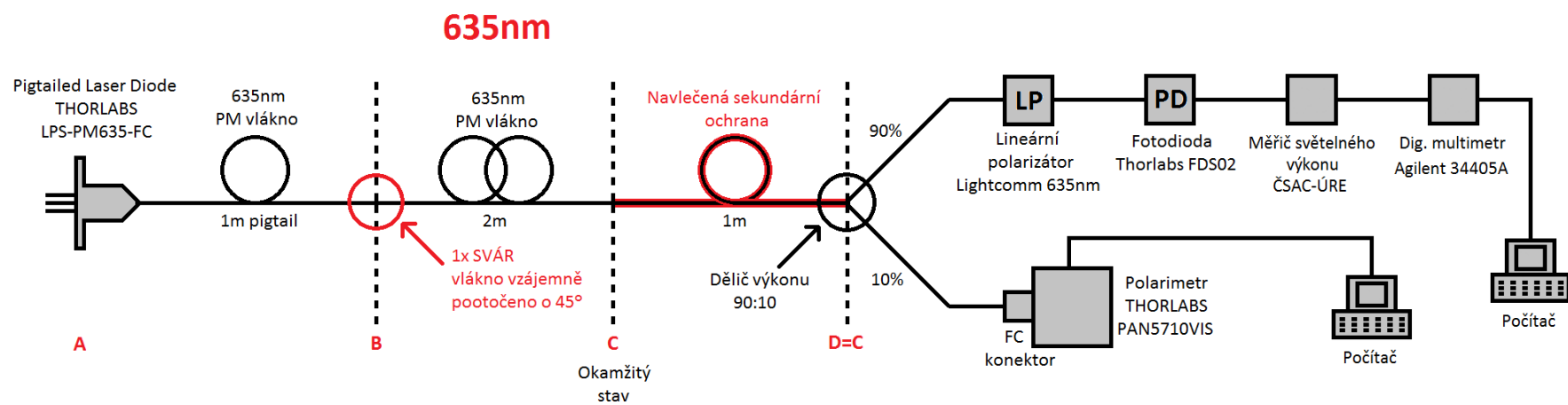
Specifikace	Hodnota
Rozsah vlnových délek	400-1100 nm
Vrchol vlnové délky	750 nm
Citlivost	0,48 A/W
Aktivní plocha průměru	0,25 mm
Doba nárůstu / poklesu	47 ps / 246 ps
NEP typická	$9,29 \times 10^{-15}$
Proudový šum (5V)	35 pA (Typ.) 500 pA (Max.)
Kapacita (5V)	0,94 pF (Typ.)
Optické prahové napětí	18 mW
Obal	TO-46 (FC/PC)
Materiál senzoru	Si
Maximální hodnoty	
Max. závěrné (reverzní) napětí	20 V
Zpětný proud	5 mA
Provozní teplota	-40 až 100 °C
Skladovací teplota	-55 až 125 °C

Na fotodiodě budu měřit světelný výkon. Fotodiodu budu připojovat na pinu 1 a 3. V případě defaultního zapojení fotodiody podle schématu dodaného výrobcem (obr. 4.13) nejsem schopen měřit malé změny. Po zapojení diody podle tohoto schématu je rozlišovací schopnost nulová. V tomto případě je potřeba signál několikanásobně zesílit. K tomu jsem použil měřič světelného výkonu ČSAC-ÚRE (obr. 3.9), který mi vstupní signál milionkrát zesílí. Tento senzor skládající se z lineárně vláknového polarizátoru, fotodiody a měřiče světelného výkonu bude fungovat na principu měření světelného výkonu, který se bude v závislosti na teplotě měnit. Lineární polarizátor je převodník okamžitého vztahu polarizace na výkon světla. Světelný výkon na fotodiodě budu měřit pomocí digitálního multimetru Agilent 34405A.



Obr. 3.9: Měřič světelného výkonu ČSAC-ÚRE

Pro porovnání je možné udělat ještě zapojení s děličem. Schéma zapojení je na obr. 3.10. Polarizační PM dělič 90:10, který pošle 90% výkonu do jedné větve a 10% do druhé a zachová nám polarizaci. Pomocí děliče jsem schopen měřit oba dva průběhy zároveň. Jsem schopen sledovat co se děje na polarimetru a zároveň jak se mění světelný výkon.



Obr. 3.10: Návrh schématu zapojení pro optimalizaci senzoru s děličem 90:10

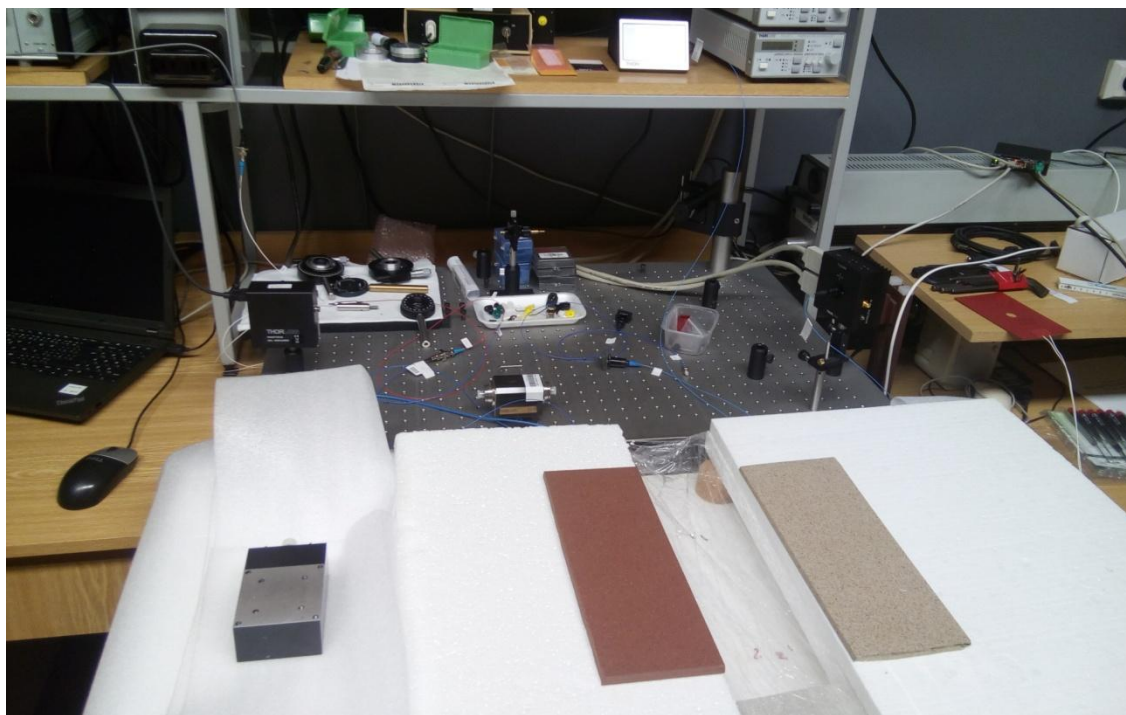
4 PRAKTICKÁ ČÁST

V této části práce jsou popsány a graficky zobrazeny průběhy jednotlivých měření. Měřením jsem ověřil chování polarizace optického vlákna při teplotním působení na toto vlákno. Teplotu v okolí vlákna jsem ovlivňoval pomocí misky s vodou o různých teplotách. Měření jsem provedl pro vlnovou délku 633nm. Sledovaným parametrem je Stokes 1, 2 a 3 a světelný výkon.

V první části je popsáno měření pomocí polarimetru Thorlabs. V další části je uvedeno měření pomocí navrhnutého senzoru teploty a jako poslední je porovnání jednotlivých metod měření.

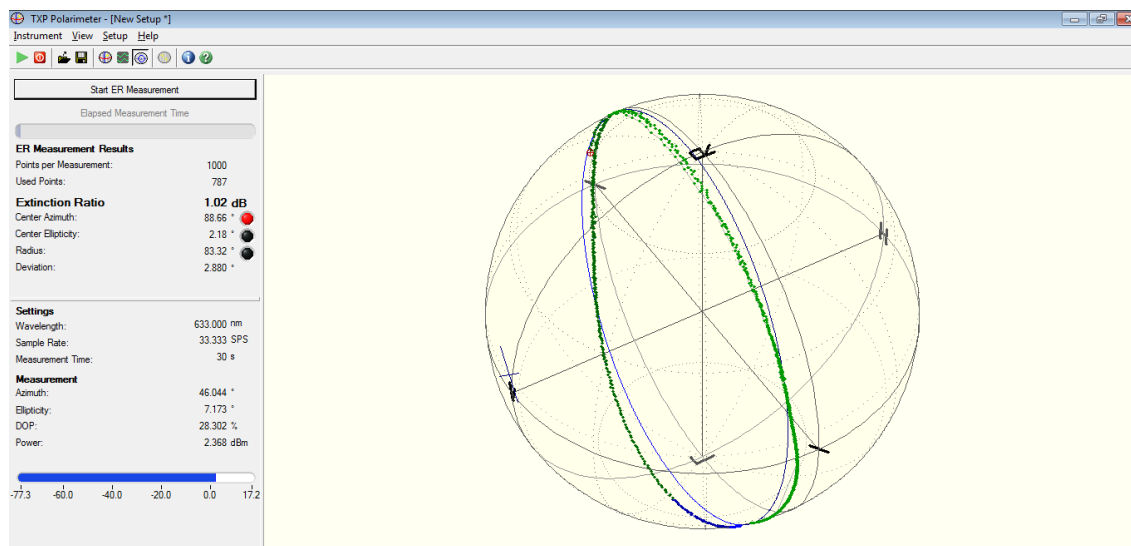
4.1 Měření polarimetrem

Pracoviště pro toto měření bylo sestaveno podle obr. 3.2. V sestavení tohoto pracoviště byl použit zdroj proudu Thorlabs CLD1010, ke kterému byla připojena laserová dioda Thorlabs LPS-PM-635-FC, pomocí které se svítilo do vlákna. Dále následovalo PM vlákno 635nm, ke kterému bylo po jednom metru přivařeno dvou metrové vlákno bez sekundární ochrany a bylo vzájemně pootočeno o 45°. Vlákno bez sekundární ochrany se nacházelo mezi polystyrénovými deskami odstíněné potravinářskou fólií. Vlákno dále pokračovalo jedním metrem vlákna s navlečenou sekundární ochranou a bylo zakončeno FC konektorem, který byl připojen do polarimetru Thorlabs PAN5710VIS s výstupem do počítače. Zapojení pracoviště v laboratoři je vidět na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Zapojení pracoviště pro měření polarimetrem

Průběh měření jsem zaznamenal pomocí polarimetru Thorlabs PAN5710VIS a jeho výstupu do počítače s použitím programu TXP Polarimetr. Měření jsem provedl pro každou teplotu v celkové délce 184 sekund. Grafické prostředí pro sledování okamžitého polarizačního stavu je vidět obr. 4.2. Jedná se o zobrazení na Poincarého kouli. Pomocí tohoto programu jsem si vygeneroval všechny změřené hodnoty jako je Time Stamp, Stokes 1, Stokes 2, Stokes 3, Azimuth, Ellipticity, Power Split Ratio, Phase Difference, DOP a Power. Z naměřených hodnot jsem vytvořil grafy jednotlivých parametrů v závislosti na čase.

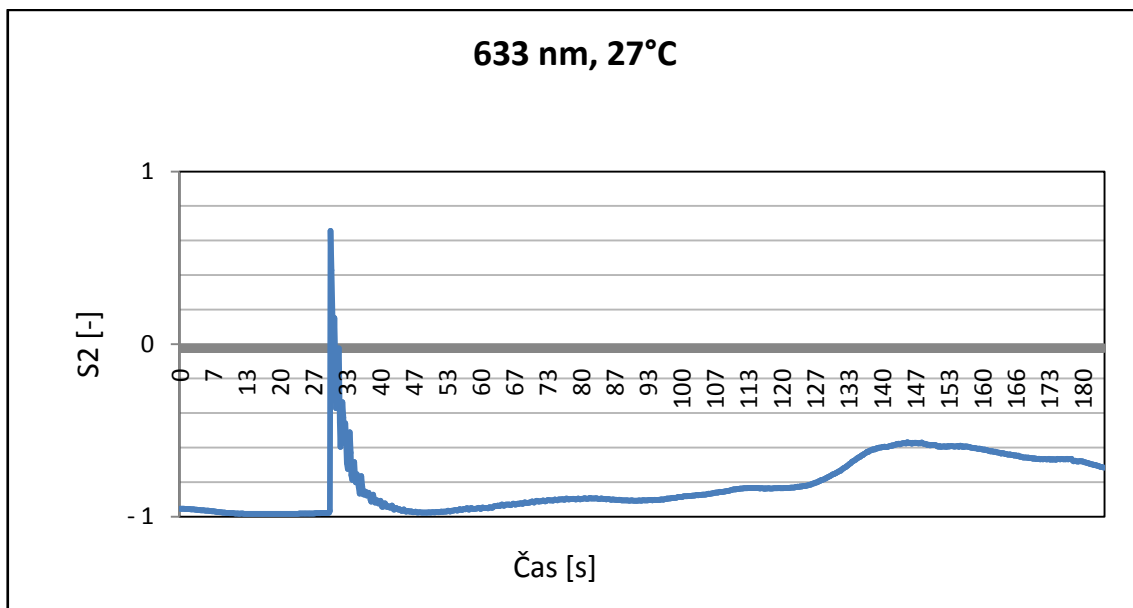


Obr. 4.2: TXP Polarimetr – zobrazení na Poincarého kouli

V prvním případě bylo měření provedeno po přiložení misky s vodou na polystyrenové desky o stejné teplotě jako byla v místnosti a to 27°C. Jednalo se o referenční měření, protože teplota vody v misce byla stejná jako teplota vzduchu v místnosti. Vzdálenost misky s vodou od vlákna byla 6 cm a mezera mezi dvěma deskami 12 cm.

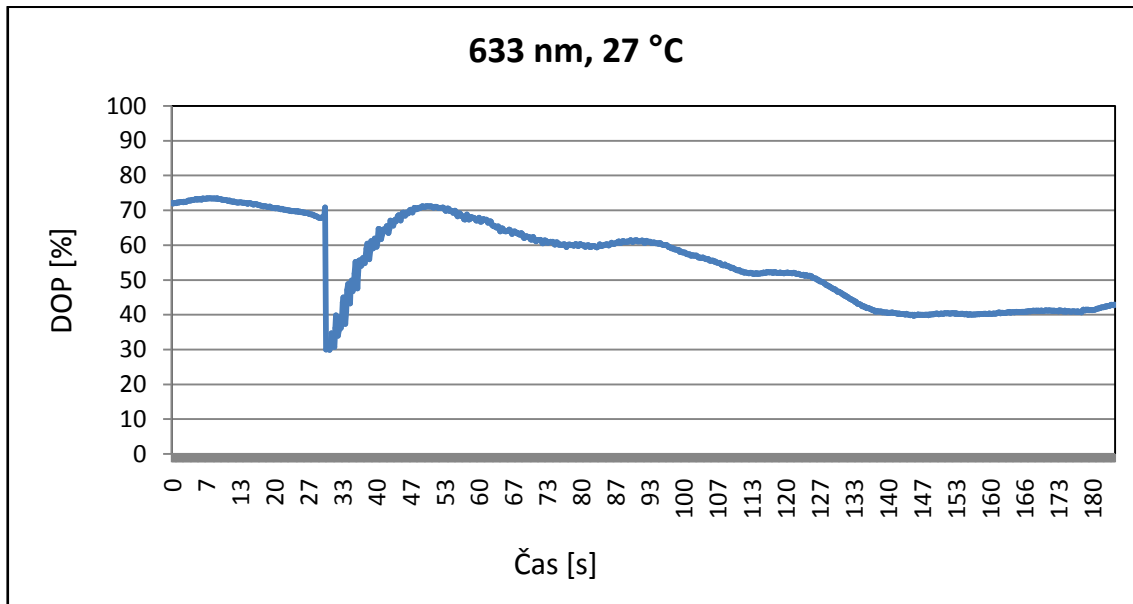
Z naměřených dat polarimetrem mě nejvíce zajímá parametr Stokes 2, pokud tedy nedojde ke stočení paprsku do jiné roviny. Dále také budu zkoumat stupeň chování polarizace (DOP) a fázový rozdíl, který polarimetr dopočítává z naměřených hodnot.

Z grafu na obr. 4.3 pro Stokesův parametr 2 je vidět, že když budím optický svazek lineárně polarizovaným světlem a tím vybudím ve vlákně zachovávající polarizaci současně pomalou a rychlou osu šíření, tak se nám stále mění stav polarizace. K tomu dochází z důvodu nepřesného vybudění rychlé a pomalé osy šíření z důvodů odchylek v FC konektorech a také tím, že vlákno není pravděpodobně dokonale vyrobeno. Celková doba měření byla 184 sekund. Misku s vodou jsem opatrně přiložil po 30 sekundách od začátku měření. V tomto grafu je patrná právě skoková změna v čase 30 sekund, kdy byla přiložena miska s vodou. To je způsobeno změnou proudění vzduchu kolem vlákna z důvodu přiložení této misky. Po určitém čase je vidět ustálení polarizačního stavu a postupný návrat na původní dráhu.



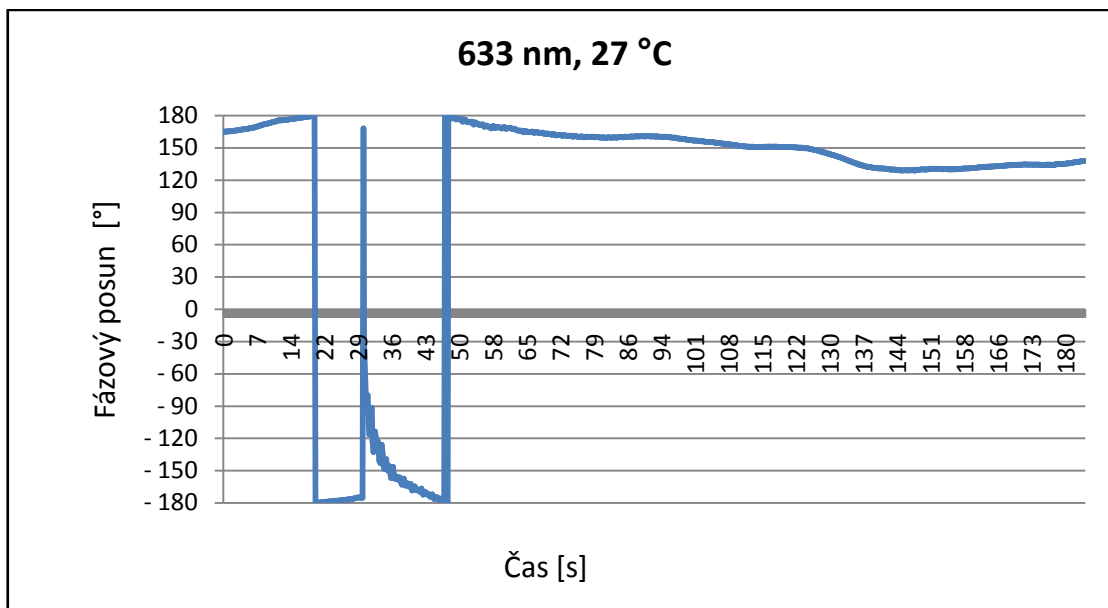
Obr. 4.3: Závislost Stokes 2 na čase pro teplotu 27°C

V grafu pro stupeň polarizace (obr. 4.3) je vidět pokles v čase 30 sekund, kdy byla přiložena miska s vodou. Následně dochází k nárůstu a postupnému ustálení stupně polarizace, který je způsoben z důvodu konstantní teploty jak v místnosti, tak i vody v misce. Tím jak se navrácí Stokes 2 k původní hodnotě, tak dochází taktéž ke stabilizaci stupně polarizace.



Obr. 4.4: Závislost stupně polarizace na čase pro teplotu 27°C

Graf na obr. 4.5 zobrazuje fázový posun. V čase 30 sekund, kdy došlo k přiložení misky s vodou vidíme výraznou změnu fázového posunu. Nejdříve došlo k fázovému posunu až k -180° a po 20 sekundách k náhlému skoku k $+180^\circ$. Fázový posun se dále začíná postupně stabilizovat ke konstantním hodnotám.

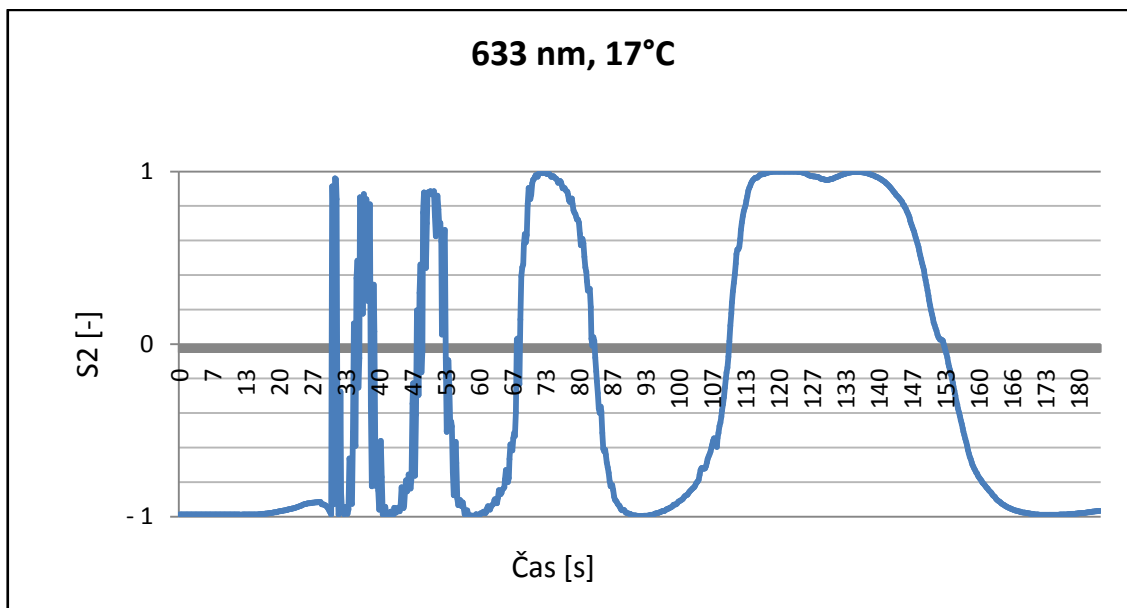


Obr. 4.5: Závislost fázového posunu na čase pro teplotu 27°C

Druhé měření jsem provedl po přiložení misky s vodou o teplotě nižší o 10°C než byla teplota v místnosti a to tedy 17°C. Schéma zapojení pracoviště zůstalo stejné jako v předchozím měření. Celková doba měření byla 184 sekund. Vzdálenost misky s vodou od vlákna byla 6 cm a vzdálenost mezi deskami 12 cm. Po 30 sekundách od počátku měření jsem přiložil na polystyrénové desky misku s vodou o teplotě 17°C.

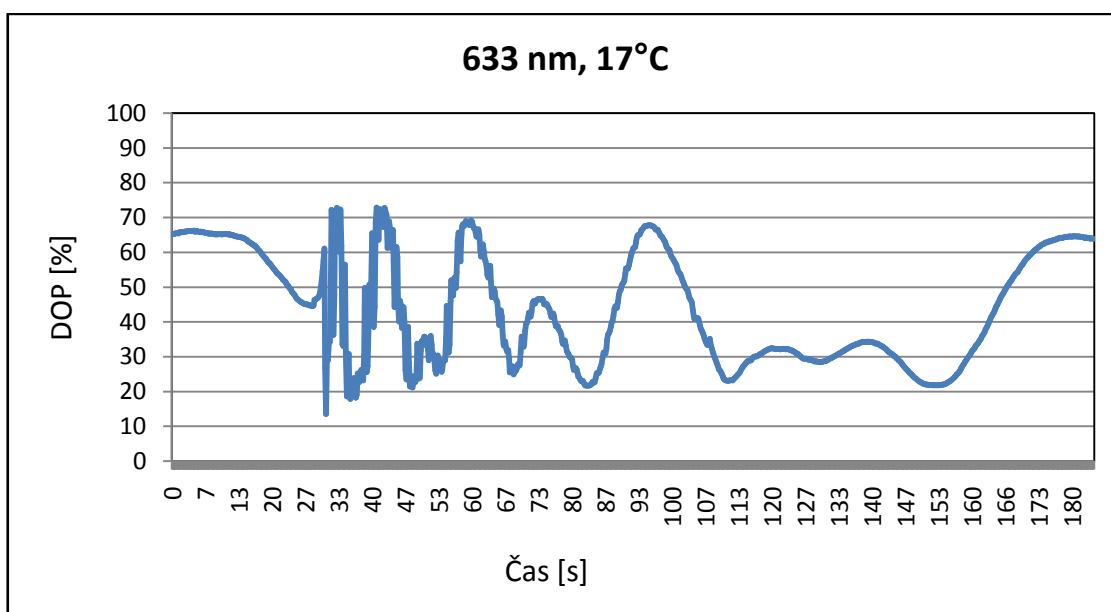
Sledovanými parametry byla opět data naměřená pomocí polarimetru a to Stokes 2, stupeň polarizace (DOP) a fázový posun.

Ve grafu na obr. 4.6 je vidět, že v čase 30 sekund se výrazně změnil průběh polarizace způsobené změnou dvojlomu jádra, které nastalo přiložením misky s vodou o teplotě 17°C. Změnou teploty jádra optického vlákna dochází ke změně fázového posunu. Skokové změny parametru S2 jsou způsobeny z důvodu neustálého proudění studeného a teplého vzduchu kolem optického vlákna. Z grafu je vidět, že skokové změny od 30 sekund, kdy došlo k přiložení misky s vodou se postupem času začínají stabilizovat a polarizace se postupně vrací na původní hodnoty.



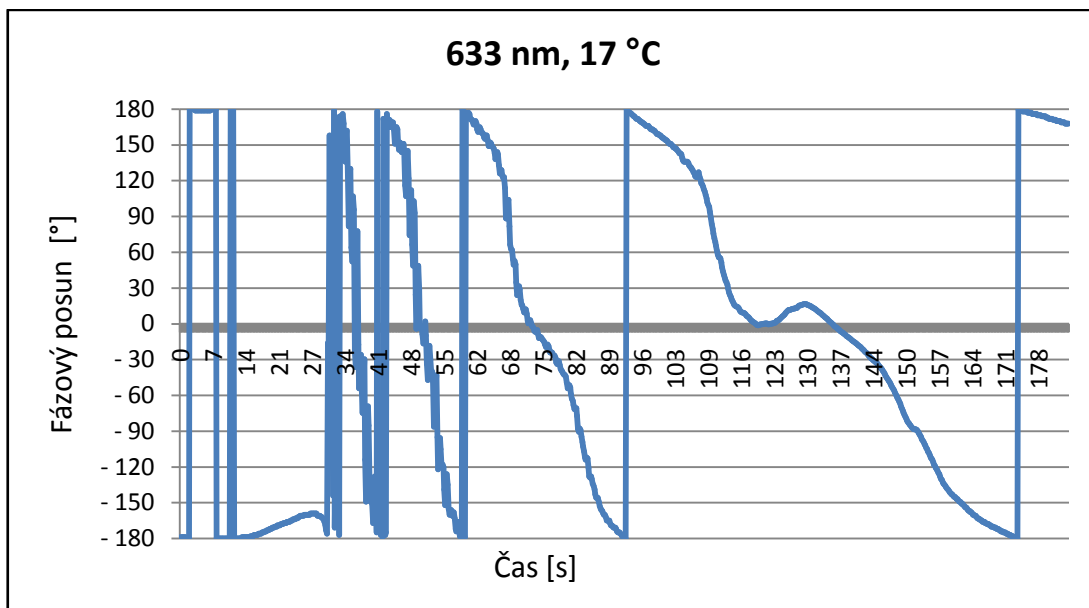
Obr. 4.6: Závislost Stokes 2 na čase pro teplotu 17°C

V grafu (obr. 4.7), který zobrazuje stupeň polarizace jsou vidět skokové změny. Z toho plyne, že stupeň polarizace je závislý na teplotě z důvodu změny dvojlomu optického vlákna v jádře. Tím jak se Stokesův parametr S_2 vrací na původní hodnotu, tak se i stupeň polarizace vrací k původní hodnotě.



Obr. 4.7: Závislost stupně polarizace na čase pro teplotu 17°C

Na posledním grafu (obr. 4.8) je zobrazen fázový posun. Ve 30 sekundě, kdy byla přiložena miska s vodou je vidět přetočení fáze z důvodu dvojlomu v jádře optického vlákna. Fázový posun není konstantní ani při ustáleném stavu.



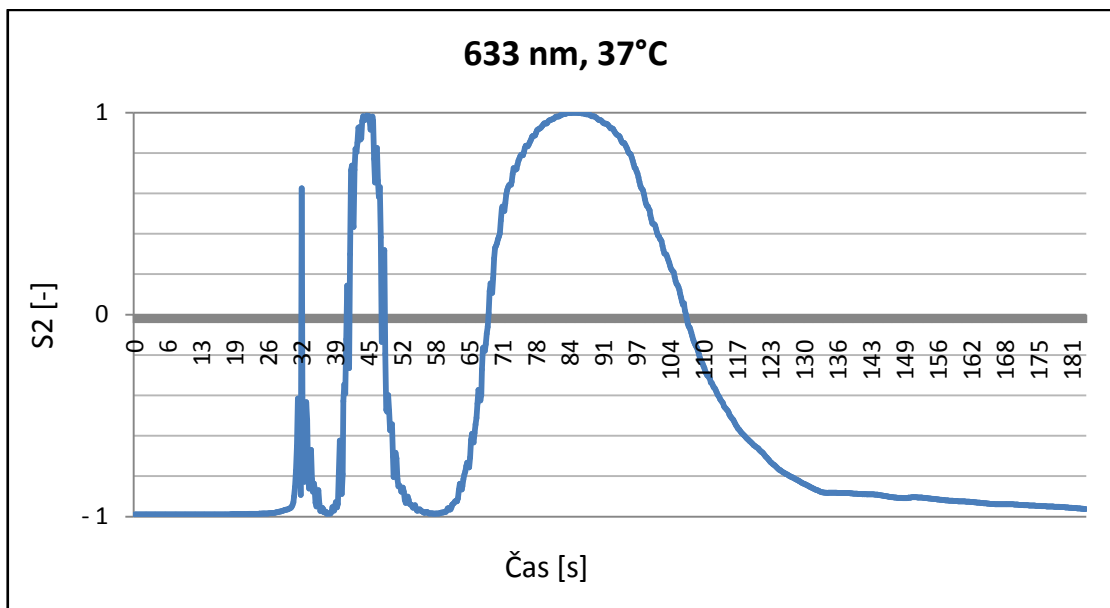
Obr. 4.8: Závislost fázového posunu na čase pro teplotu 17°C

Poslední měření tohoto druhu bylo provedeno za pomoci stejného zapojení jako v předchozích měřeních. Postup měření byl stejný jako v minulých měřeních a schéma zapojení je na obr. 3.2. Zjišťoval jsem chování stavu polarizace pro vlákno zachovávající polarizaci po přiložení misky s vodou o teplotě vyšší než byla v místnosti a to konkrétně 37°C.

Celková doba měření byla 184 sekund. Vzdálenost misky s vodou od vlákna byla 6 cm a vzdálenost mezi deskami 12 cm. Po 30 sekundách od počátku měření jsem přiložil na polystyrénové desky misku s vodou o teplotě 37°C.

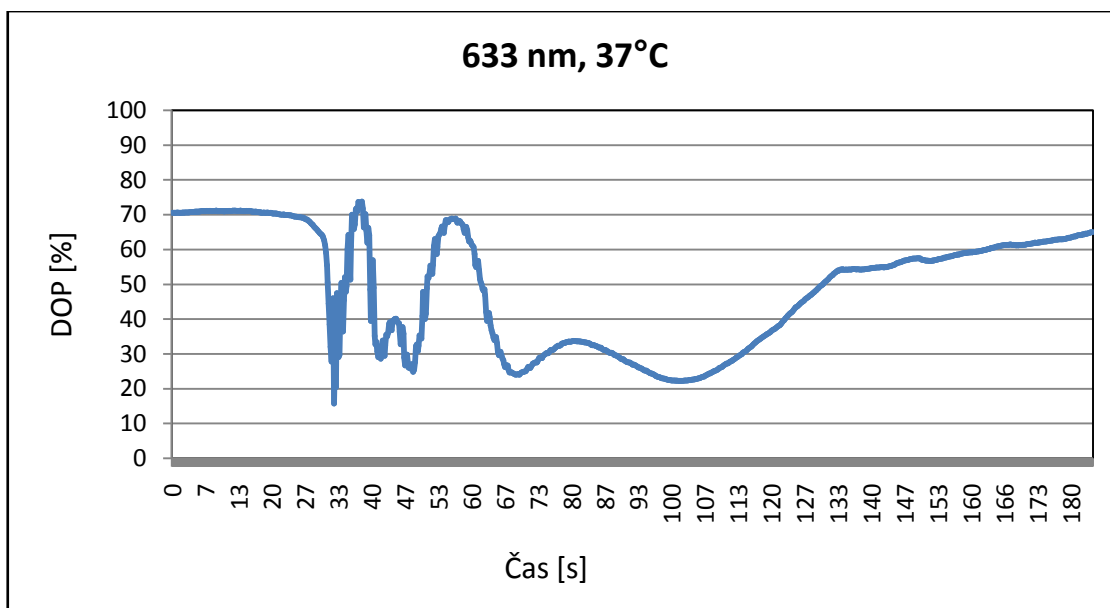
Sledovanými parametry naměřenými polarimetrem jako v předcházejících měřeních jsou opět Stokes 2, stupeň polarizace (DOP) a fázový posun.

Stejně jako v předchozím měření je vidět na obr. 4.9 skoková změna ve 30 sekundě, kdy byla přiložena miska s teplou vodou. V tomto případě je vidět méně skokových změn oproti předcházejícímu měření s vodou o teplotě 17°C. To je způsobeno tím, že u teplé vody směřuje tepelný tok směrem nahoru oproti studené vodě, kde směřuje dolů. Tím dochází k menší změně dvojlomu v jádře optického vlákna a také změně polarizačního stavu.



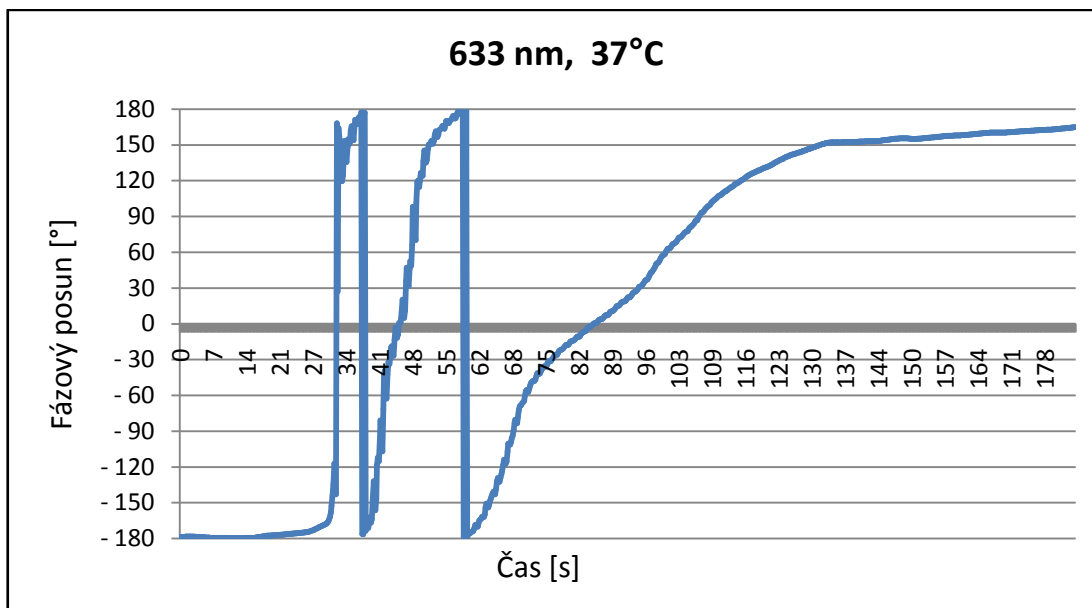
Obr. 4.9: Závislost Stokes 2 na čase pro teplotu 37°C

V grafu, který zobrazuje stupeň polarizace (obr. 4.10) je vidět pokles a následný nárůst v době, kdy byla přiložena miska s teplou vodou. Ke konci měření se hodnoty vrací k původní hodnotě, tím jak se srovnává Stokes 2.



Obr. 4.10: Závislost stupně polarizace na čase pro teplotu 37°C

Na posledním grafu je zobrazen fázový posun (Obr. 4.11), který má narůstající tendenci způsobenou měnícím se Stokesovým parametrem S2.



Obr. 4.11: Závislost fázového posunu na čase pro teplotu 37°C

4.2 Měření pomocí navrhnutého senzoru

Toto pracoviště bylo sestaveno podle navrhnutého schématu zobrazeného na obr. 3.7. Reálné měřicí pracoviště je vidět na obr. 4.12.

V pravé spodní části jsou vidět polystyrénové desky, které chrání optické vlákno od proudění okolního vzduchu a na které jsem přikládal misku s vodou. Dále v pravé horní části je umístěn kompaktní laserový diodový řadič Thorlabs CLD1010 ve kterém je umístěna laserová dioda ThorLabs LPS-PM635-FC. Jedná se o zdroj proudu a zároveň reguluje teplotu laserové fotodiody na 20°C. Ve středu obrázku je umístěn na držáku polarimetr Thorlabs PAN5710VIS, vedle kterého se nachází polarizační dělič Lightcomm 635nm a nad polarimetrem fotodioda Thorlabs FDS02. V levé horní části je umístěn digitální multimetr Agilent 34405A a vedle něj se nachází měřič světelného výkonu ČSAC-ÚRE. V levé spodní části se nacházejí počítače, pomocí kterých probíhalo zaznamenávání naměřených hodnot.

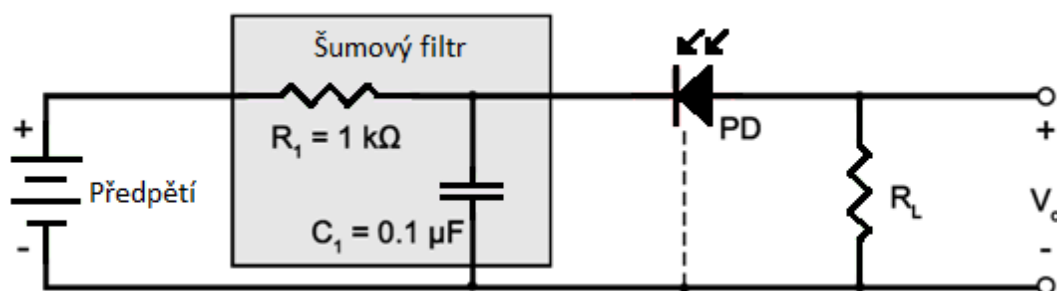


Obr. 4.12: Zapojení pracoviště pro měření navrhnutým senzorem

Pro měření byly zvoleny jako v předcházejícím měření stejné teploty, aby bylo možné naměřené hodnoty porovnat. Důležité bylo neudělat velké teplotní rozdíly, protože když jsou velké teplotní rozdíly, tak vznikají velké skoky a schopnost měřit velké rozdíly je malá. Nižší rozdíly teplot mají větší vypovídající hodnotu. Teploty pro měření byly zvoleny 17°C, 27°C a 37°C. Teplota 37°C je strategická teplota, protože se jedná o teplotu lidského těla. V případě teploty 27°C jde o referenční hodnotu, protože tato teplota byla teplota vzduchu v laboratoři, kde probíhalo měření.

V případě tohoto měření, kde se jednalo o modifikaci stávajícího řešení byl místo polarimetru Thorlabs PAN5710VIS použit polarizační dělič Lightcomm 635nm, fotodioda Thorlabs FDS02, měřič světelného výkonu ČSAC-ÚRE, digitální multimetr Agilent 34405A a počítač, který zaznamenával naměřené hodnoty.

Fotodiodou Thorlabs FDS02 měříme proud jaký protéká touto diodou, když na ni dopadá světlo a fotodioda se začíná otevírat. Měříme proud v závěrném směru. V případě defaultního zapojení fotodiody (obr. 4.12) nejsem schopen měřit malé změny. Po zapojení diody podle tohoto schématu byla rozlišovací schopnost nulová.



Obr. 4.13: Schéma pro zapojení fotodiody

Pro můj účel práce bylo zapotřebí signál několikanásobně zesílit, aby bylo možné naměřit vypovídající hodnoty. Zařazením kalibrovaného měřiče světelného výkonu měřím proud v závěrném směru na fotodiodě a dostanu mnohonásobně zesílený signál.

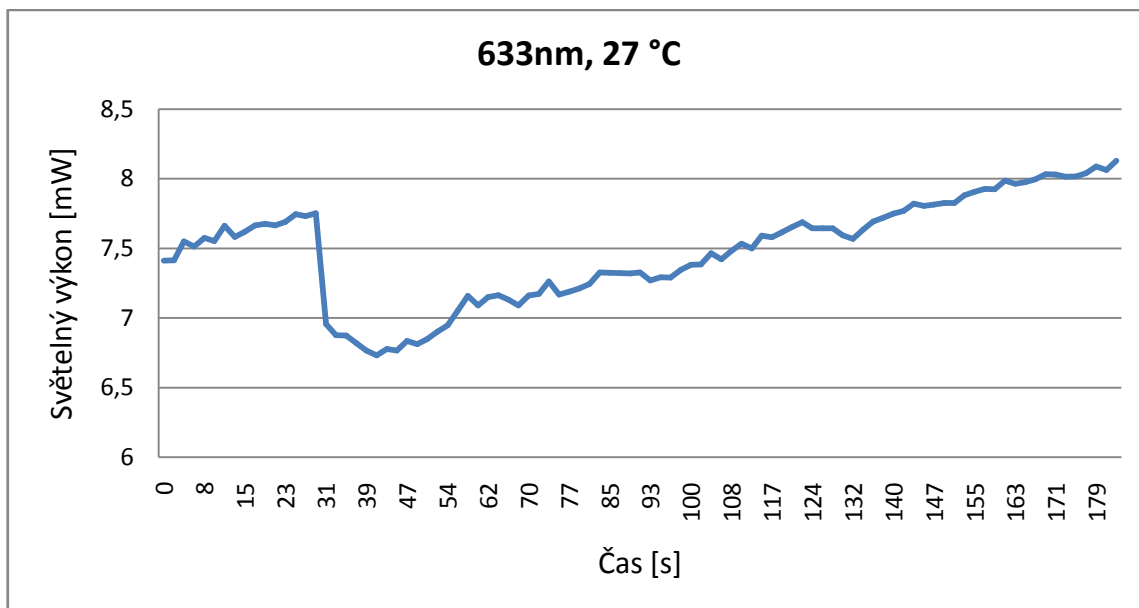
Navíc měřím následujícím způsobem. Mám měřič světelného výkonu, který má převodník na napětí a výstup na který posílá vstupní hodnoty milionkrát zesíleny. Místo proudu mám tedy napětí, které se dá lépe měřit. Dále mám digitální multimetr Agilent 34405A, který je připojený k počítači a je nastaven tak, aby pomocí programu Microsoft Exel zaznamenával přibližně každou sekundu naměřený světelný výkon v miliwattech.

První měření tohoto druhu probíhalo v laboratoři, kde byla teplota 27°C. Měřicí pracoviště bylo sestaveno podle obr. 3.7. a je popsáno výše. Jednalo se o měření za stejných podmínek jako probíhalo měření pomocí polarimetru Thorlabs PAN5710VIS. Měření probíhalo v celkové délce 184 sekund. Prostřednictvím kompaktního laserového diodového řadiče Thorlabs CLD1010 ve kterém je umístěna laserová dioda ThorLabs LPS-PM635-FC a je vidět na obr. 4.14 jsem budil proudem diodu. Z obrázku je patrné, že dioda byla buzena proudem 49,9mA a byla chlazena na 19,97°C.



Obr. 4.14: Kompaktní laserový diodový řadič Thorlabs CLD1010

Nádoby s vodou o teplotě 27°C jsem přiložil po 30 sekundách od začátku měření na polystyrénové desky a dále 154 sekund zaznamenával hodnoty. Nádoba s vodou byla vzdálena 6 cm od optického vlákna a mezera mezi polystyrénovými deskami byla 12 cm. Z naměřených hodnot, které jsem zaznamenal do Excelu jsem vytvořil graf závislosti světelného výkonu na čase. Tento graf je zobrazen na obr. 4.15.

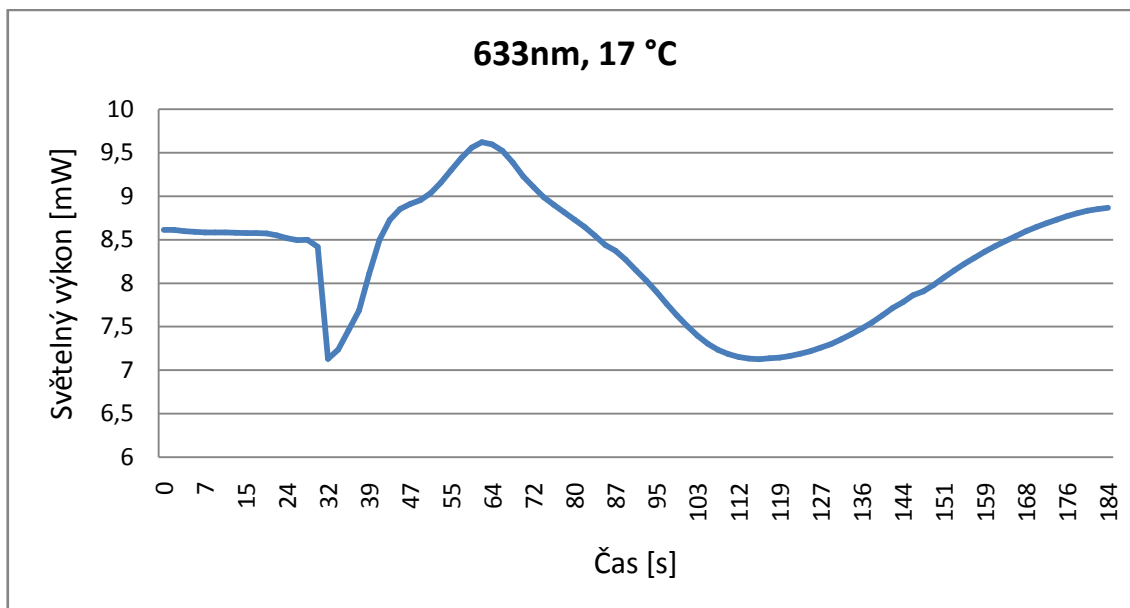


Obr. 4.15: Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 27°C

Z grafu je patrné, že vlivem působení různých teplot na optické vlákno dochází ke změně výkonu v závislosti na čase. V ustáleném stavu ještě před přiložením misky s vodou se výkon pohybuje v rozmezí 7,41–7,75mW.

V čase 30 sekund, kdy byla přiložena miska s vodou dochází k okamžitému poklesu výkonu až k hodnotě 6,73mW. K tomu došlo vlivem změny proudění vzduchu kolem vlákna ovlivněné přiloženou miskou s vodou. V grafu je vidět, že výkon klesal až do 40 sekundy. Od 41 sekundy dochází k postupnému zvyšování výkonu a postupnému ustálení s minimálními skokovými výkyvy. Hodnota výkonu roste od 6,73mW až k 8,13mW do konce měření.

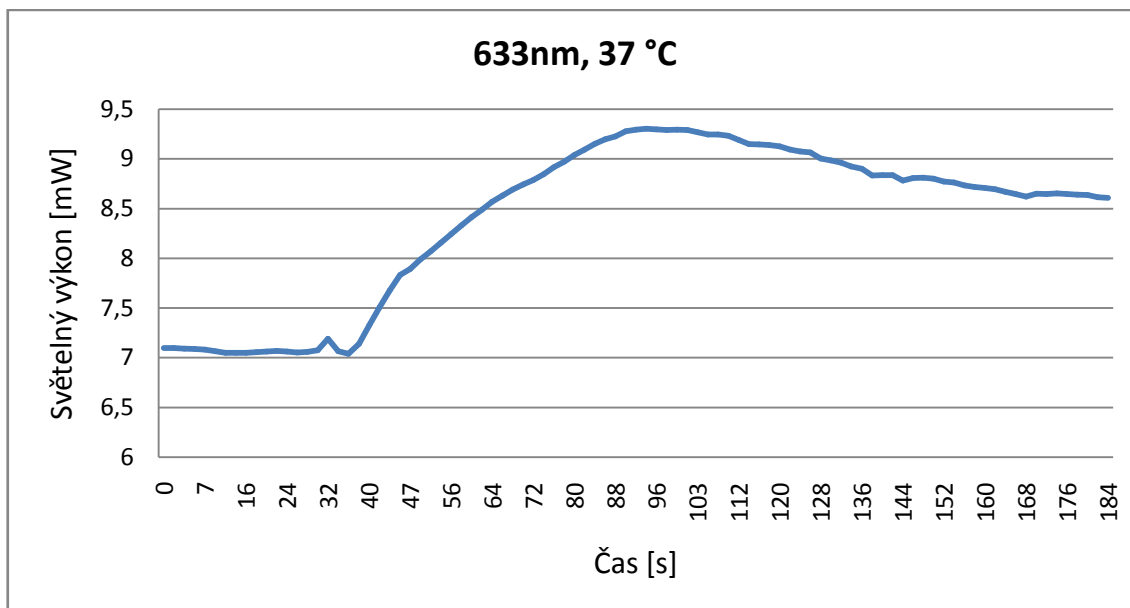
Jako další jsem provedl měření, kdy jsem přiložil na polystyrénové desky misku s vodou o teplotě nižší o 10°C než byla teplota v místnosti. Jednalo se o přiložení misky s vodou o teplotě 17°C. Podmínky pro měření byly stejné jako u prvního měření. Doba měření byla 184 sekund. Misku se studenou vodou jsem na desky přikládal opět ve 30 sekundě a miska byla ve stejné vzdálenosti jako v předchozím případě.



Obr. 4.16: Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 17°C

Z grafu (obr. 4.16) vyplývá, že konstantní hodnota před přiložením misky s vodou byla v rozmezí 8,49–8,61mW. Po přiložení misky s vodou ve 30 sekundě došlo k okamžitému poklesu výkonu až na hodnotu 7,12mW. Dále následovalo postupné zvyšování výkonu až do času 62 sekund, kdy výkon dosáhl hodnoty 9,61mW. Výkon dále začal postupně klesat až k hodnotě 7,13mW v čase 117 sekund. Od té doby výkon nadále rostl až k hodnotě 8,86mW, kde došlo k postupné stabilizaci výkonu.

Třetí měření probíhalo za stejných podmínek jako první a druhé akorát s rozdílnou teplotou misky s vodou. Celková délka měření byla 184 sekund. Laserová dioda byla buzena proudem 49,9mA. Vzdálenost misky s vodou od vlákna byla opět 6 cm a vzdálenost mezi deskami 12cm. Teplota vody v misce byla 37°C. Jedná se o důležitou teplotu, protože se jedná o teplotu, která je stejná jako teplota lidského těla. Z toho důvodu můžeme z tohoto měření vycházet, že na optické vlákno může působit teplota lidského těla. Tím pádem se jedná o měření, kde jsem teplotní působení lidského těla nahradil nádobou s vodou o stejné teplotě. Misku s vodou jsem přiložil na polystyrénové desky po 30 sekundách od začátku měření. Z naměřených hodnot jsem opět sestrojil graf závislosti světelného výkonu na čase. Tento graf je znázorněn na obr. 4.17.



Obr. 4.17: Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 37°C

Stejně jako v předchozích měřeních je z grafu zřejmá skoková změna ve 30 sekundě, kdy byla přiložena miska s vodou o teplotě 37°C. Z grafu je vidět méně skokových změn než tomu bylo u předcházejícího měření s vodou o teplotě 17°C. Dochází k tomu z důvodu toho, že u teplé vody směřuje tepelný tok směrem nahoru oproti studené vodě, kde směřuje dolů. U teplotního působení vyšší teplotou než je v okolí vlákna dochází k menší změně dvojlomu v jádře optického vlákna a také změně polarizačního stavu. V ustáleném stavu se výkon pohybuje v intervalu 7,04–7,09mW. Ve 30 sekundě dochází k postupnému zvyšování výkonu, který vrcholí hodnotou 9,3mW v 94 sekundě. Následuje postupný pokles výkonu a ke konci měření se výkon začíná stabilizovat na hodnotě 8,61–8,65mW.

4.3 Analýza naměřených hodnot

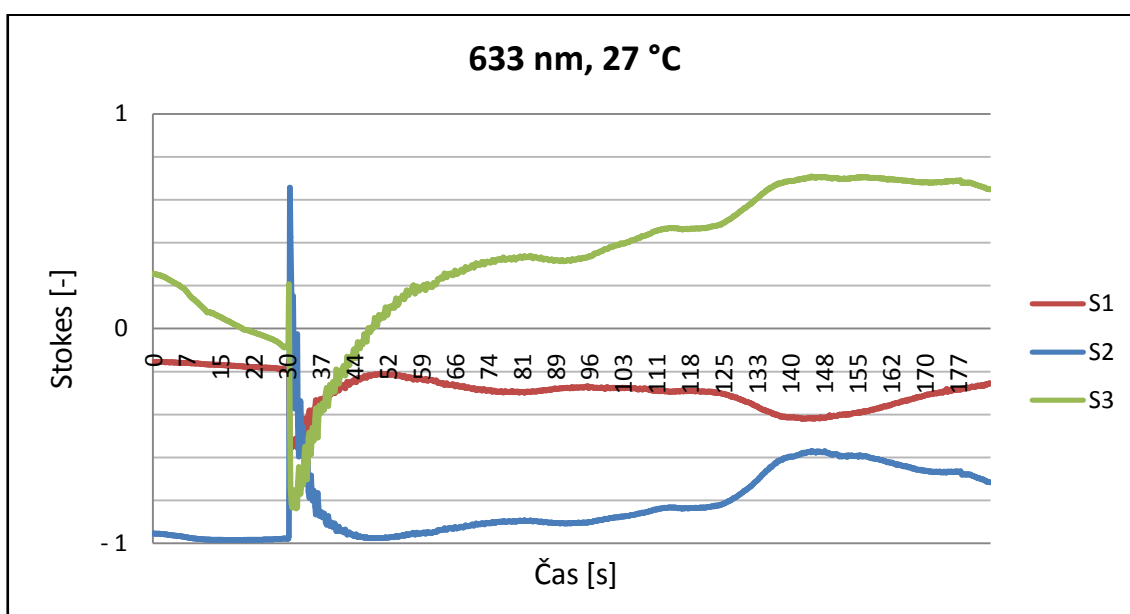
Jedná se o porovnání naměřených hodnot dvěma různými způsoby. V prvním případě se jedná o zapojení podle obr. 3.2. V tomto zapojení byl pro získávání naměřených hodnot použit polarimetr Thorlabs PAN5710VIS, který byl připojen k počítači a pomocí počítačového programu TXP Polarimetr jsem zaznamenal naměřené hodnoty. Jedná se o změřené hodnoty jako je Time Stamp, Stokes 1, Stokes 2, Stokes 3, Azimuth, Ellipticity, Power Split Ratio, Phase Difference, DOP a Power. Z těchto hodnot jsem vytvořil grafy v závislosti na čase. V mém případě se jednalo o závislost Stokes 1, 2 a 3 na čase, dále závislost stupně polarizace na čase a závislost fázového posunu na čase.

V druhém případě bylo pracoviště zapojeno podle obr. 3.7. Zapojení bylo podobné jako v prvním případě, akorát byl polarimetr Thorlabs PAN5710VIS nahrazen polarizátorem Lightcomm 635nm, fotodiodou Thorlabs FDS02, měřičem světelného výkonu ČSAC-ŮRE a digitálním multimetr Agilent 34405A, který byl připojen k počítači. Pomocí digitálního multimetru jsem zaznamenával do počítače naměřený světelný výkon, který se zapisoval do předem připravené tabulky v programu Microsoft Excel.

Z těchto hodnot jsem vytvořil grafy v závislosti na čase. V mém případě se jednalo o závislost světelného výkonu na čase.

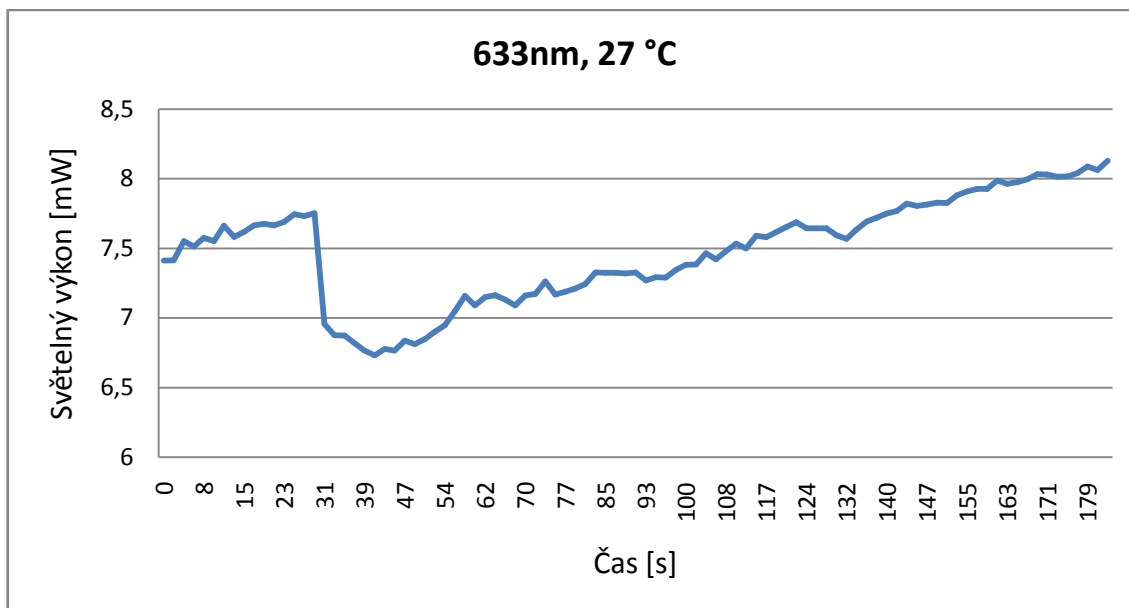
Pro porovnání naměřených dat z prvního typu měření za použití polarimetru jsem využil hodnoty naměřené jako Stokes 1, 2 a 3 v závislosti na čase. Z druhého typu měření, kde byl použit polarizátor, fotodiody, měřič světelného výkonu a digitální multimetr jsem použil naměřený výkon v závislosti na čase.

V prvním případě se jedná o porovnání naměřených hodnot, které byly naměřeny při přiložení misky s vodou o teplotě 27°C. V tomto případě se jednalo o referenční měření, protože teplota vody v misce byla stejná jako okolní teplota vzduchu v laboratoři. Na obr. 4.18 je zobrazen graf, který byl sestaven z naměřených hodnot polarimetrem. Jedná se o závislost Stokesova parametru S1, S2 a S3 v závislosti na čase.



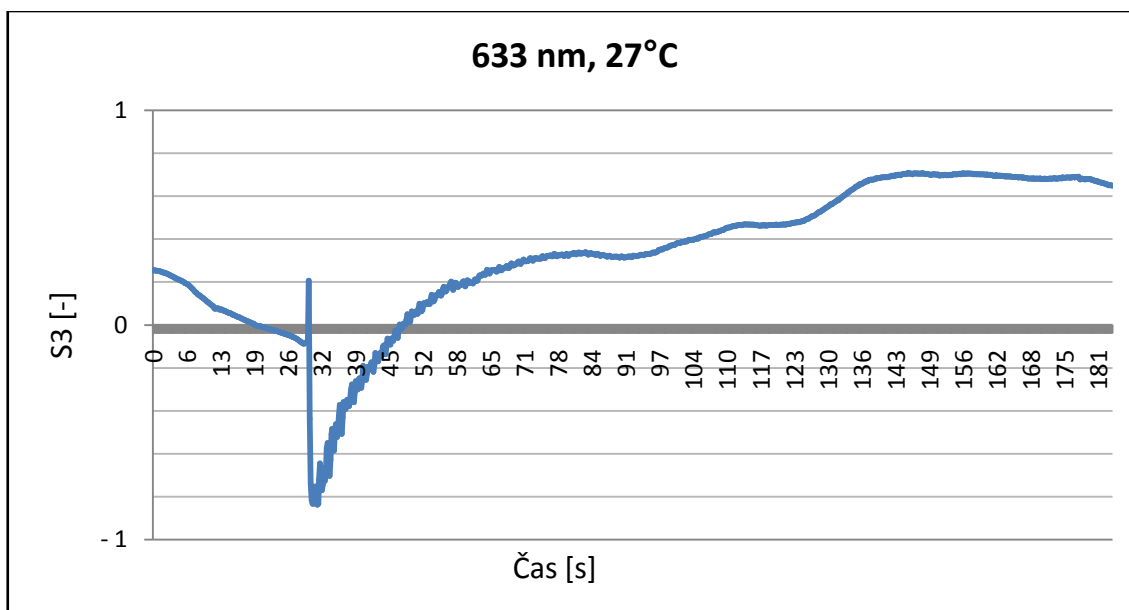
Obr. 4.18: Závislost Stokes 1, 2 a 3 na čase pro teplotu 27°C

Na následujícím obrázku (obr. 4.19) je zobrazen graf závislosti světelného výkonu na čase, který byl vytvořen z naměřených hodnot pomocí polarizátoru, fotodiody, měřiče světelného výkonu a multimetru.



Obr. 4.19: Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 27°C

Při porovnání grafu měřeného pomocí polarizátoru, fotodiody, měřiče světelného výkonu a multimetru se průběhem nejvíce přibližuje grafu závislosti Stokes 3 na čase. Samostatný graf závislosti Stokes 3 na čase je vidět na obr. 4.20.

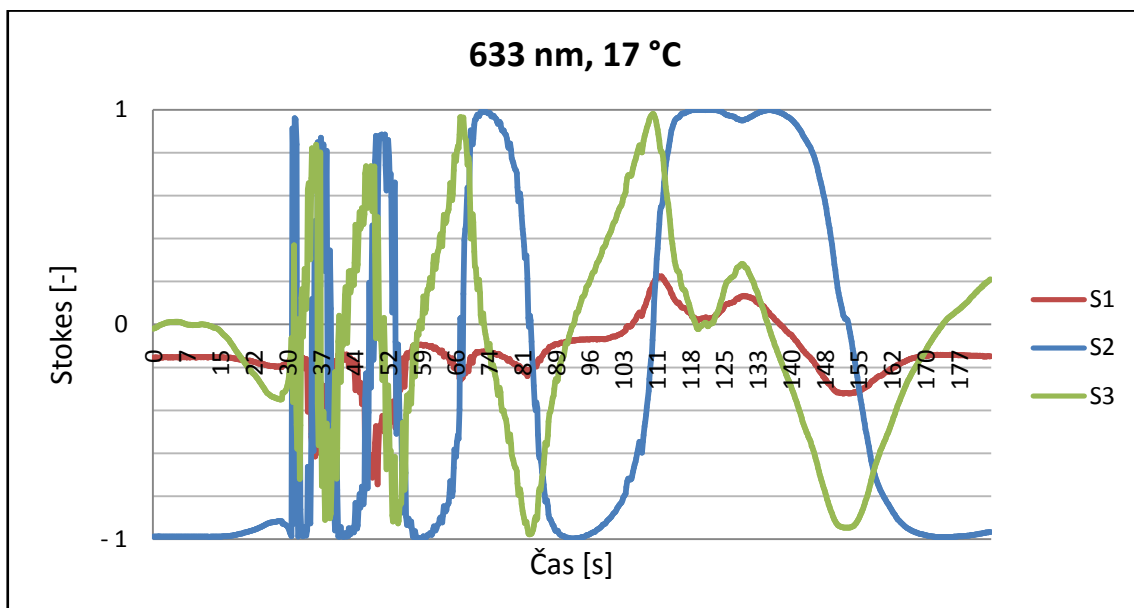


Obr. 4.20: Závislost Stokes 3 na čase pro teplotu 27°C

Z grafu je patrný ustálený stav prvních 30 sekund, kdy náhle po přiložení misky s vodou dochází k okamžitému poklesu a následnému postupnému růstu až téměř do konce měření.

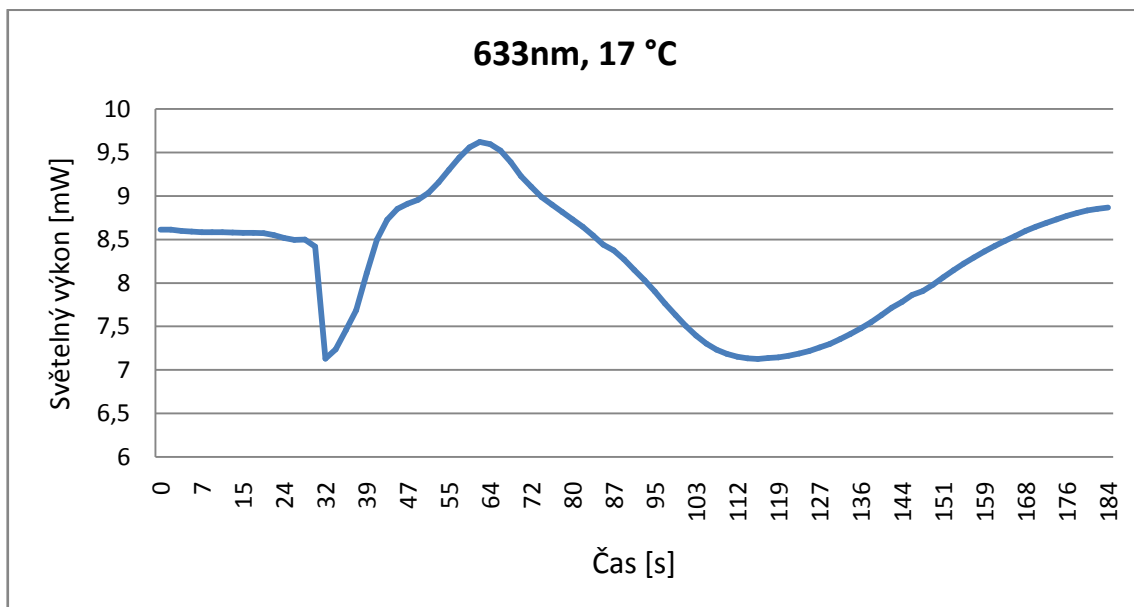
V dalším případě jsou porovnávány grafy po přiložení misky s vodou o teplotě nižší než byla teplota v laboratoři a to 17°C. V tomto případě působí na optické vlákno studený vzduch. Na obr. 4.21 je zobrazen graf pro teplotu 17°C, který byl sestrojen

z naměřených hodnot polarimetrem. Jedná se o závislost Stokesova parametru S1, S2 a S3 v závislosti na čase.



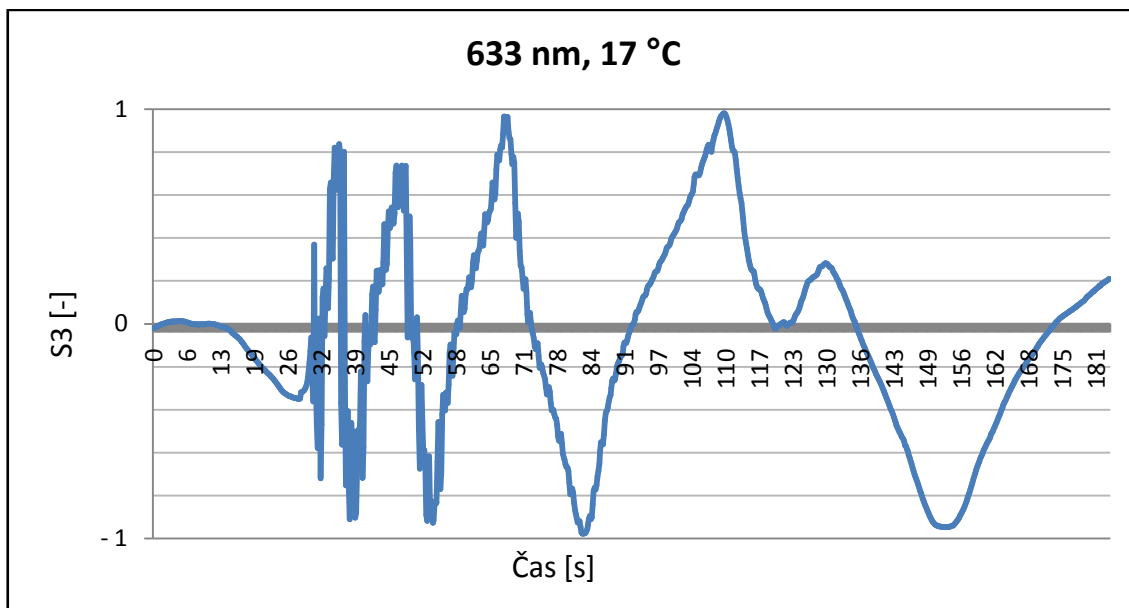
Obr. 4.21: Závislost Stokes 1, 2 a 3 na čase pro teplotu 17°C

Na následujícím obrázku (obr. 4.21) je zobrazen graf závislosti světelného výkonu na čase při působení misky s vodou o teplotě 17°C, který byl vytvořen z naměřených hodnot pomocí polarizátoru, fotodiody, měřiče světelného výkonu a multimetru.



Obr. 4.22: Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 17°C

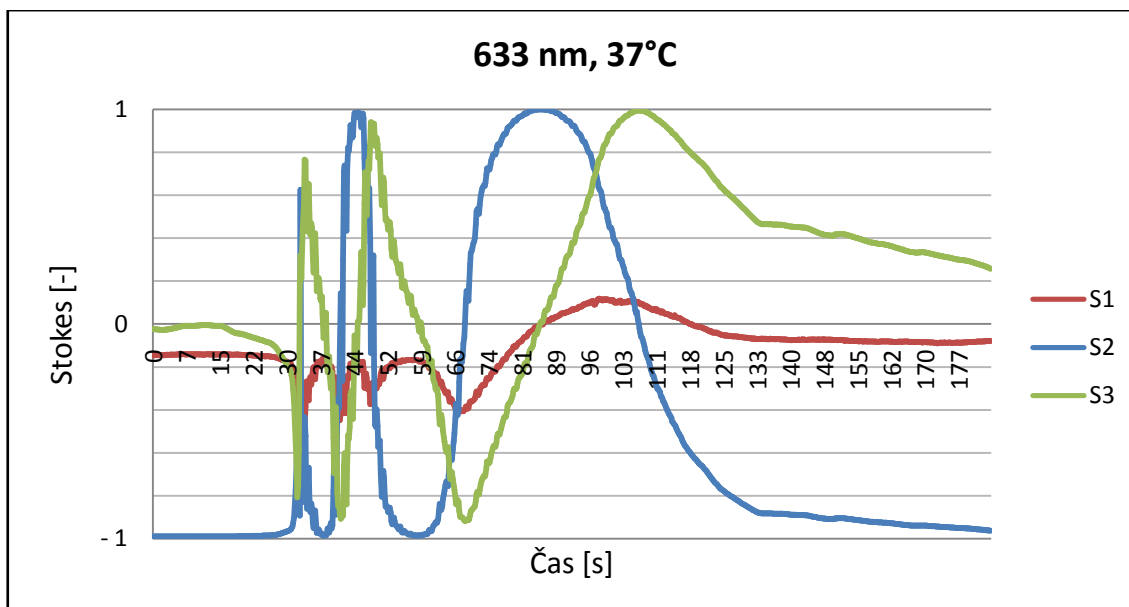
Při porovnání grafu měřeného pomocí polarizátoru, fotodiody, měřiče světelného výkonu a multimetru se průběhem nejvíce přibližuje grafu závislosti Stokes 3 na čase. Samostatný graf závislosti Stokes 3 na čase je vidět na obr. 4.23.



Obr. 4.23: Závislost Stokes 3 na čase pro teplotu 17°C

Z grafu je patrný ustálený stav prvních 30 sekund, kdy náhle po přiložení misky s vodou dochází k okamžitému poklesu a následnému růstu a klesání až téměř do konce měření, kdy se interval klesání a stoupání postupem času prodlužuje.

V posledním případě se jedná o porovnání naměřených hodnot, které byly naměřeny při přiložení misky s vodou o teplotě 37 °C. V tomto případě se jedná o důležitou teplotu, protože se jedná o teplotu, která je stejná jako teplota lidského těla. Na obr. 4.24 je zobrazen graf, který byl sestaven z naměřených hodnot polarimetrem. Jedná se o závislost Stokesova parametru S1, S2 a S3 v závislosti na čase.

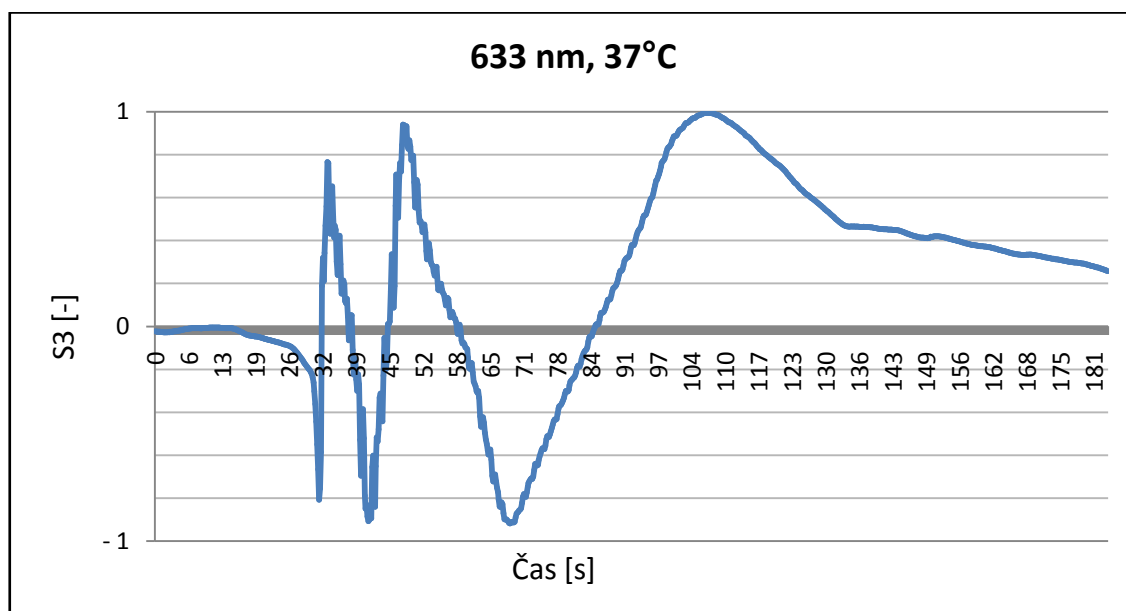


Obr. 4.24: Závislost Stokes 1, 2 a 3 na čase pro teplotu 37°C

633nm, 37 °C

Čas [s]	Světelný výkon [mW]
0	7.1
7	7.1
16	7.0
24	7.0
32	7.1
36	7.2
40	7.1
47	7.8
56	8.2
64	8.5
72	8.7
80	9.0
88	9.2
96	9.3
103	9.3
112	9.2
120	9.1
128	9.0
136	8.9
144	8.8
152	8.8
160	8.7
168	8.6
176	8.6
184	8.6

Při porovnání grafu měřeného pomocí polarizátoru, fotodiody, měřiče světelného výkonu a multimetru se průběhem nejvíce přibližuje grafu závislosti Stokes 3 na čase. Samostatný graf závislosti Stokes 3 na čase je vidět na obr. 4.26.



Z grafu je patrný ustálený stav prvních 30 sekund, kdy náhle po přiložení misky s teplou vodou dochází k okamžitému poklesu a rychlému nárůstu hodnot třikrát za sebou až do času 110 sekund a dále dochází k pozvolnému klesání hodnot.

Z měření vyplývá, že Stokes 2, který má určovat L+45P a L-45P se v tomto případě neprojevil jako vhodný, protože záleží na rovině do které se paprsek natočil. Z měření vyplývá, že Stokesův parametr 3 má nejvyšší vypovídající hodnotu, protože se nejvíce podobá naměřeným hodnotám pomocí polarizátoru, fotodiody, měřiče světelného výkonu a multimetru. Z toho plyne, že paprsek se s největší pravděpodobností natočil do roviny odpovídající Stokesovu parametru 3.

Ze všech průběhů měření pomocí fotodiody je patrné, že navrhnutý senzor okamžitě reaguje na změnu teploty v okolí optického vlákna. Reakce po přiložení misky s vodou byla vždy okamžitá a došlo k náhlému poklesu nebo vzrůstu světelného výkonu.

5 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byla analýza způsobu šíření světla optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami s důrazem na jejich matematický popis pomocí Jonesových a Stokesových vektorů a způsoby zobrazení okamžitého stavu polarizovaného světla na Poincarého kouli.

Práci jsem rozdělil do 4 základních kapitol. V první kapitole této práce jsem popsal vlnovou teorii světla. Kapitulu jsem rozdělil na Fresnelovu vlnovou teorii, polarizační elipsu, degenerované polarizační stavy, parametry polarizační elipsy, Poincarého kouli a degenerované stavy na Poincarého kouli.

Následující kapitola popisuje polarizaci světla, kde jsem uvedl Stokesovy polarizační parametry a jeho vektory. Dále jsem popsal Jonesovy polarizační parametry, vektory a Muellerovu matici.

V další kapitole jsem popsal zapojení stávajícího měřicího pracoviště a návrh optimalizace teplotního senzoru.

V první části této kapitoly jsem popsal stávající řešení měření teploty pomocí polarimetru ThorLabs PAN5710VIS a následné zobrazení na Poincarého kouli v počítačovém programu TXP Polarimetr. Zapojení je provedeno následujícím způsobem: jako první je použita laserová dioda ThorLabs LPS-PM365-FC, 1 metr PM vlákna 635nm, svár mezi vlákny, kde jsou vlákna vzájemně pootočena o 45°, vlákno pokračuje 2 metry vlákna, na které teplotně působím, dále 1 metr vlákna s navlečenou sekundární ochranou, FC konektor a polarimetr ThorLabs PAN5710VIS s výstupem do počítače. Je zde dále popsán způsob šíření světla vláknem a matematické vyjádření pomocí Jonesových a Stokesových parametrů.

Jako další jsem popsal návrh optimalizace teplotního senzoru. Jsou zde přesně charakterizovány použité součástky a jejich specifikace. Použité součástky jsou lineární vláknový polarizátor Lightcomm 635nm, měřič světelného výkonu ČSAC-ÚRE, fotodioda ThorLabs FDS02 a digitální multimetr Agilent 54405A. Optimalizace teplotního senzoru spočívá v nahrazení polarimetru lineárním polarizátorem, fotodiodou, měřičem světelného výkonu a multimetrem. Tím, že se nám bude měnit výkon naměřeného světla na fotodiodě, tak budu schopen zjistit, že se změnila teplota.

V poslední části této práce jsem popsal praktická měření. V první podkapitole je zobrazen postup měření s použitím polarimetru Thorlabs PAN5710VIS. Jsou zde popsány a zobrazeny grafy naměřených hodnot. Jedná se o grafy Stokes 2, stupeň polarizace a fázový posun v závislosti na čase. Měření bylo provedeno pro teploty 17°C, 27°C a 37°C, které působily na optické vlákno.

V druhé podkapitole jsem zpracoval měření pomocí lineárního polarizátoru, fotodiody, měřiče světelného výkonu a digitálního multimetru. Měření jsem provedl stejným postupem a pro stejné teploty jako v předchozím měření pomocí polarimetru. Pomocí multimetru připojenému k počítači jsem zaznamenal přibližně každou sekundu naměřený výkon. Z naměřených hodnot jsem sestrojil grafy závislosti světelného výkonu na čase pro každou teplotu.

Jako poslední jsem provedl zhodnocení naměřených hodnot pomocí polarimetru a navrhnutého senzoru. Porovnal jsem sestrojené grafy jednotlivých měření o třech

různých teplotách, které působily při měření na optické vlákno. Z měření vyplývá, že Stokesův parametr 3 naměřený polarimetrem má největší vypovídající hodnotu, protože se nejvíce podobá naměřeným hodnotám pomocí polarizátoru, fotodiody, měřiče světelného výkonu a multimetru. Z toho vyplývá, že paprsek se s největší pravděpodobností natočil do roviny odpovídající Stokesovu parametru 3.

Ze všech průběhů měření je patrné, že navrhnutý senzor okamžitě reaguje na změny teploty v okolí optického vlákna. Reakce po přiložení misky s vodou byla vždy okamžitá a došlo k náhlému poklesu nebo vzrůstu výkonu.

LITERATURA

- [1] COLLETT, Edward. *Field guide to polarization*. Bellingham, Wash.: SPIE Press, c2005. SPIE field guides, FG05. ISBN 0819458686
- [2] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno: M. Filka, 2009. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [3] COLLETT, Edward. *Polarized light in fiber optics*. Lincroft: The PolaWave Group, 2003. ISBN 9780819457615.
- [4] KUMAR, Arun a A. K. GHATAK. *Polarization of light with applications in optical fibers*. Bellingham, Wash.: SPIE Press, c2011. Tutorial texts in optical engineering, v. TT 90. ISBN 0819482153.
- [5] *Journal of optical and fiber communications research*. New York, NY: Springer Science+Business Media. ISSN 1867-3007
- [6] Pigtailed Laser Diodes: LPS-PM635-FC. *ThorLabs* [online]. [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5997&pn=LPS-PM635-FC#5999
- [7] Unmounted Photodiodes: FDS02. *ThorLabs* [online]. [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=285&pn=FDS02#1290
- [8] Polarimeter Systems: PAN5710VIS. *ThorLabs* [online]. [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1564&pn=PAN5710VIS
- [9] Polarization Maintaining Components: In-line Polarizer. *Lightcomm* [online]. [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <http://www.lightcomm.com/home/product/view/typeid/190/id/210.html>
- [10] DUŠEK, Martin a Michal MAZANEC. *Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů* [online]. 2012 [cit. 2016-10-25]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1206.pdf
- [11] AGRAWAL, G. P. *Fiber-optic communications systems*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, c2002. Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. ISBN 0-471-21571-6.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

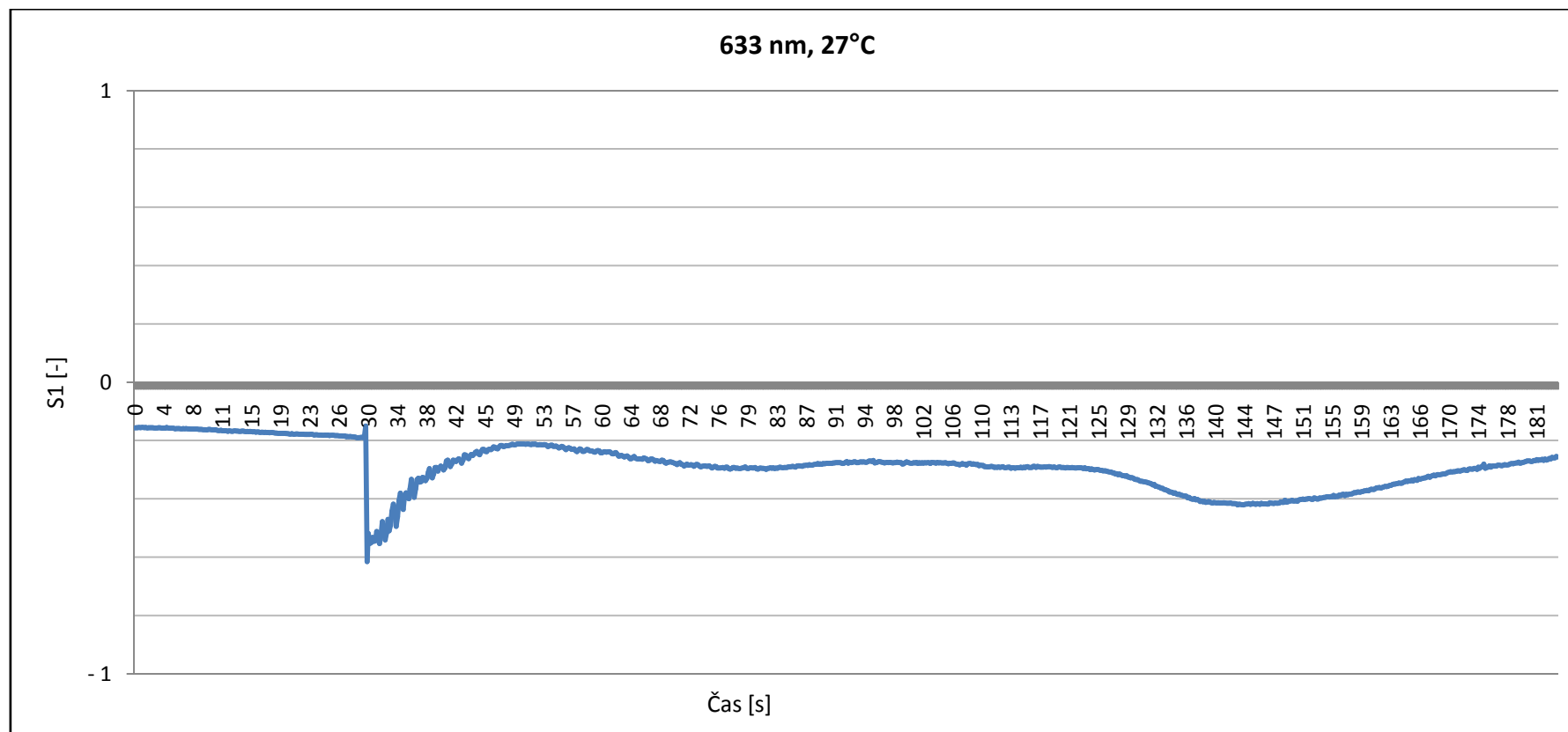
E_{0x}	Maximální amplituda v ose x
E_{0y}	Maximální amplituda v ose y
ω	Úhlová frekvence
δ	Fázový posun mezi osou x a y
λ	Vlnová délka
Ψ	Úhel natočení
χ	Úhel eliptičnosti
S	Stokesův vektor
S_i	Parametr Stokesova vektoru
J	Jonesova matice
M	Muellerova matice
φ	Fázový posun

SEZNAM PŘÍLOH

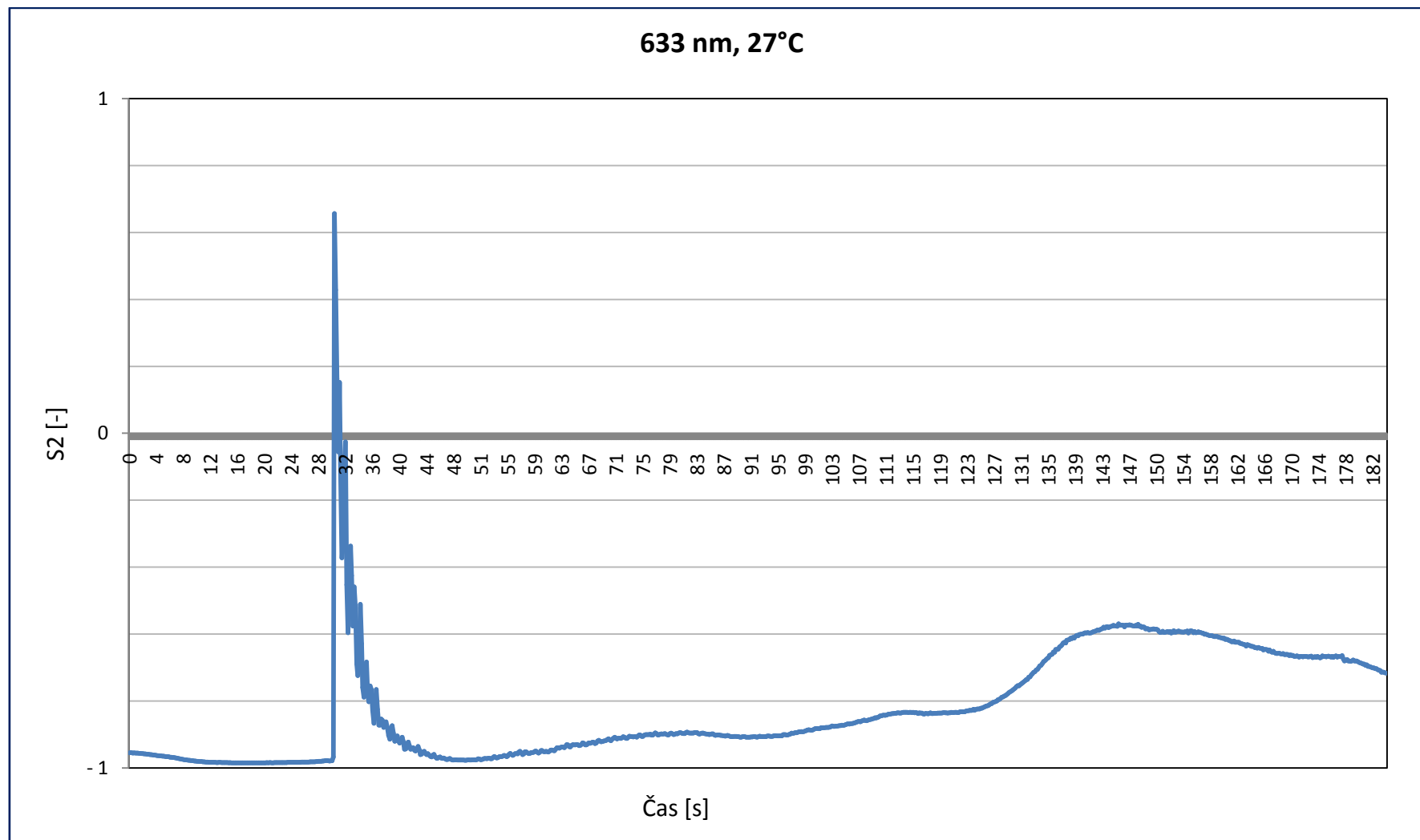
A	GRAFY NAMĚŘENÝCH HODNOT	49
A.1	Závislost Stokes 1 na čase pro teplotu 27°C	49
A.2	Závislost Stokes 2 na čase pro teplotu 27°C	50
A.3	Závislost Stokes 3 na čase pro teplotu 27°C	51
A.4	Závislost Stokes 1, 2 a 3 na čase pro teplotu 27°C	52
A.5	Závislost stupně polarizace na čase pro teplotu 27°C	53
A.6	Závislost fázového posunu na čase pro teplotu 27°C	54
A.7	Závislost Stokes 1 na čase pro teplotu 17°C	55
A.8	Závislost Stokes 2 na čase pro teplotu 17°C	56
A.9	Závislost Stokes 3 na čase pro teplotu 17°C	57
A.10	Závislost Stokes 1, 2 a 3 na čase pro teplotu 17°C	58
A.11	Závislost stupně polarizace na čase pro teplotu 17°C	59
A.12	Závislost fázového posunu na čase pro teplotu 17°C	60
A.13	Závislost Stokes 1 na čase pro teplotu 37°C	61
A.14	Závislost Stokes 2 na čase pro teplotu 37°C	62
A.15	Závislost Stokes 3 na čase pro teplotu 37°C	63
A.16	Závislost Stokes 1, 2 a 3 na čase pro teplotu 37°C	64
A.17	Závislost stupně polarizace na čase pro teplotu 37°C	65
A.18	Závislost fázového posunu na čase pro teplotu 37°C	66
A.19	Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 27°C	67
A.20	Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 17°C	68
A.21	Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 37°C	69

A GRAFY NAMĚŘENÝCH HODNOT

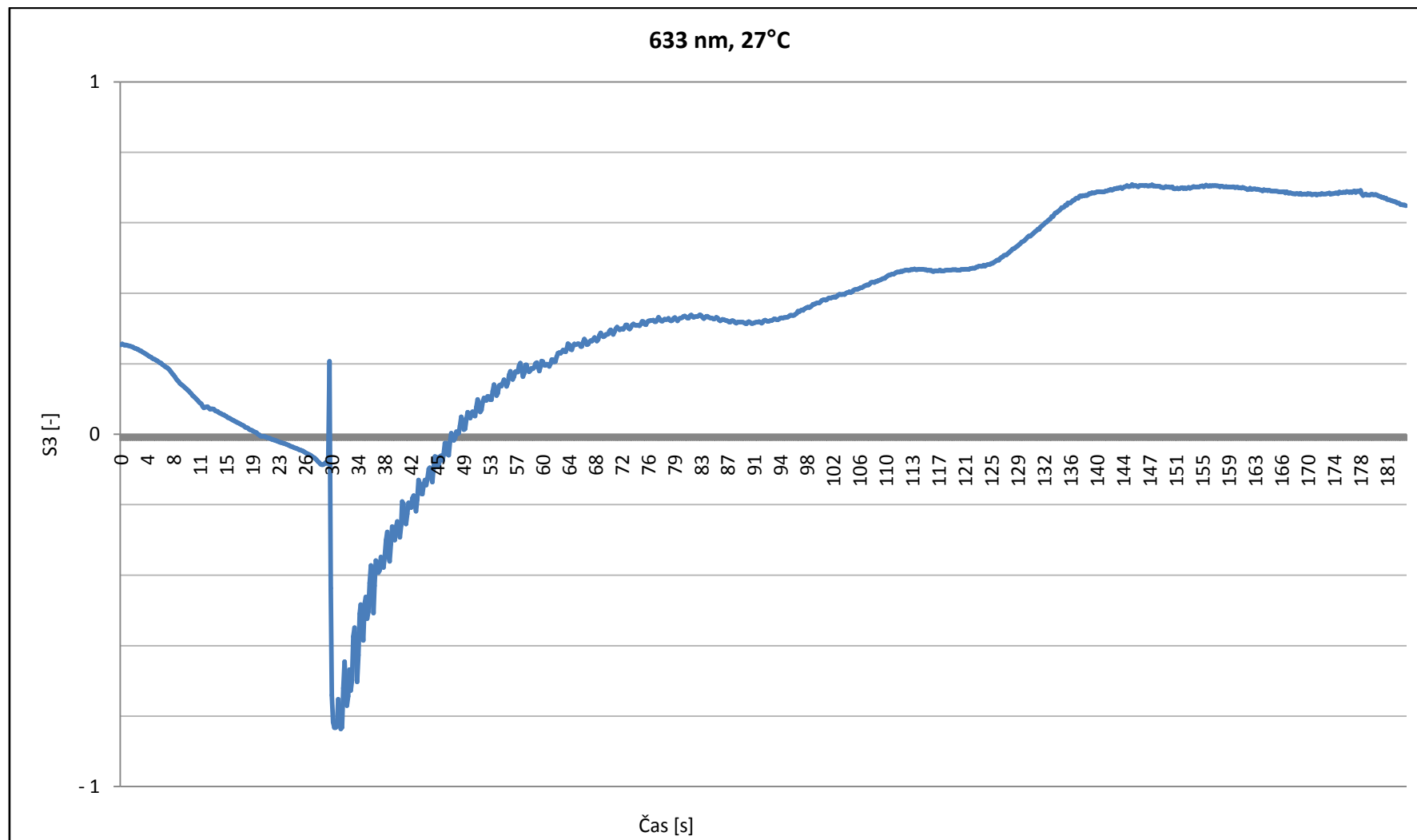
A.1 Závislost Stokes 1 na čase pro teplotu 27°C



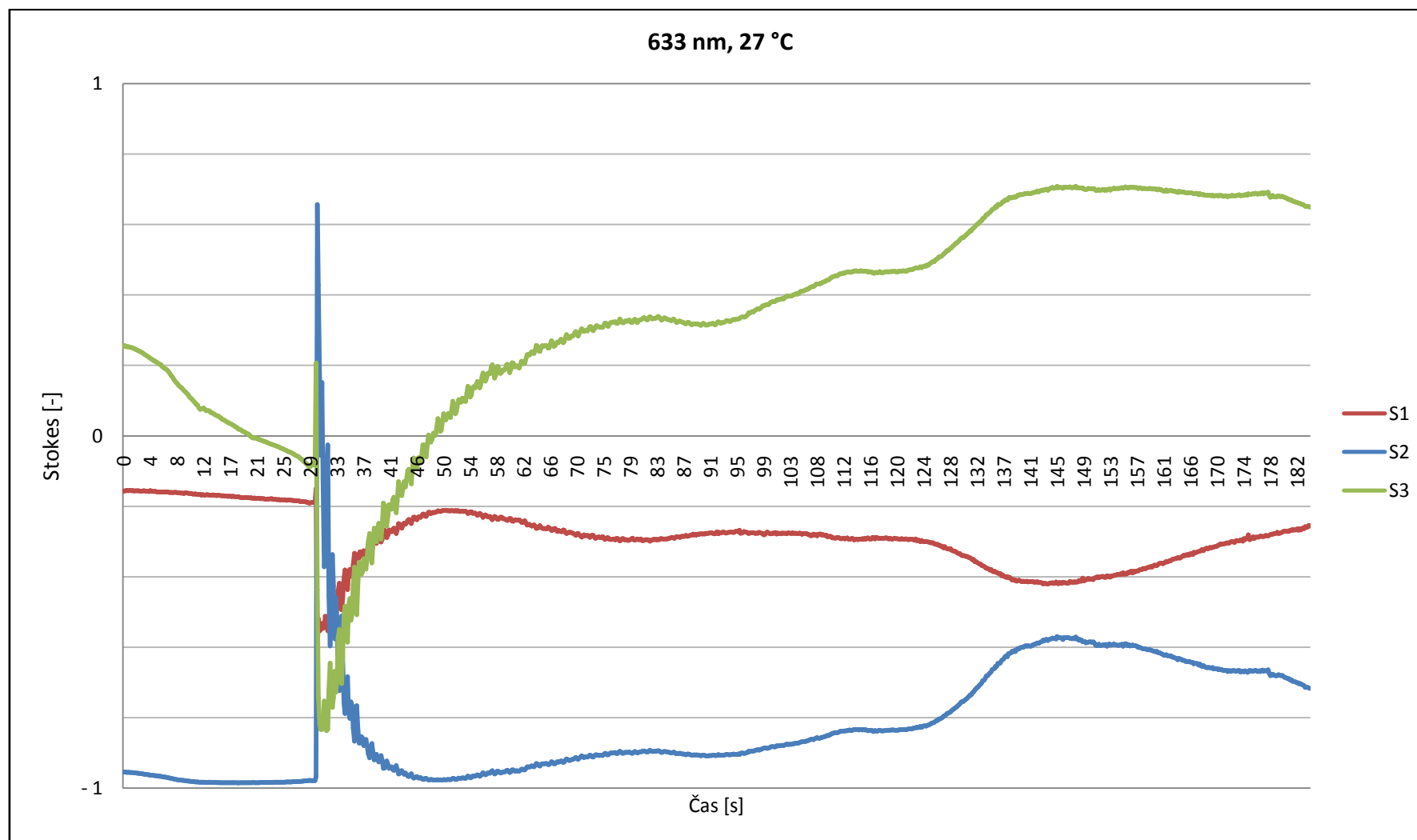
A.2 Závislost Stokes 2 na čase pro teplotu 27°C



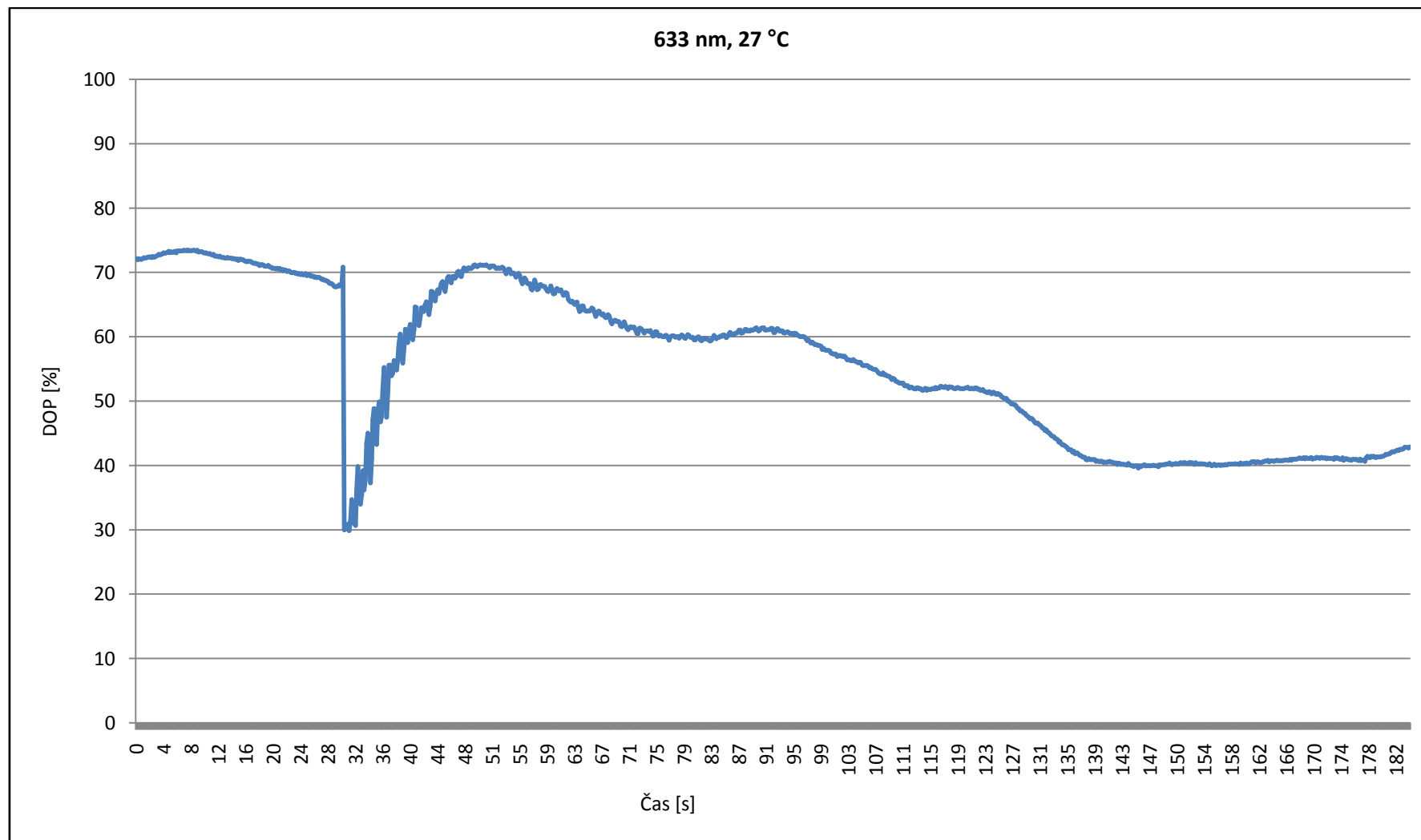
A.3 Závislost Stokes 3 na čase pro teplotu 27°C



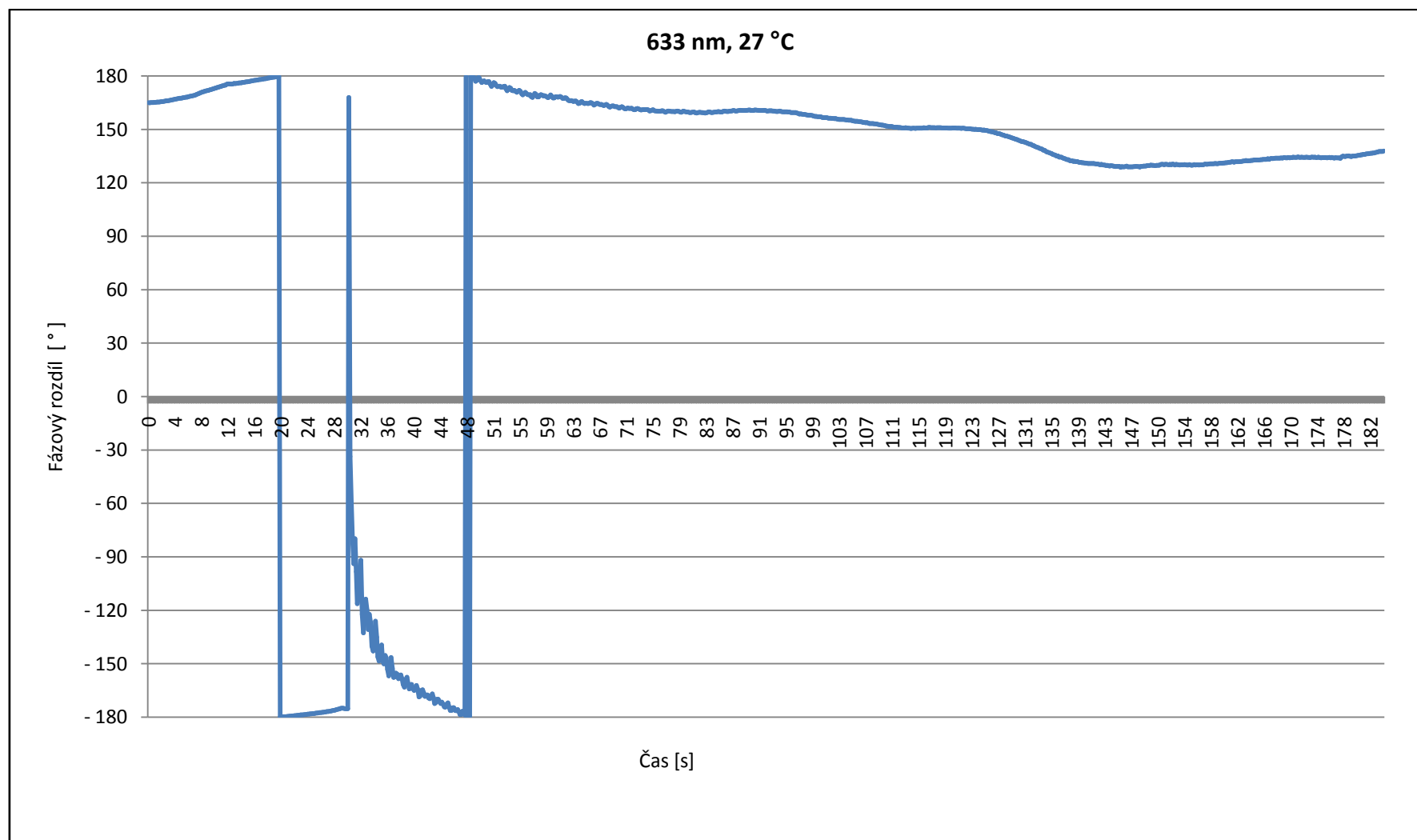
A.4 Závislost Stokes 1, 2 a 3 na čase pro teplotu 27°C



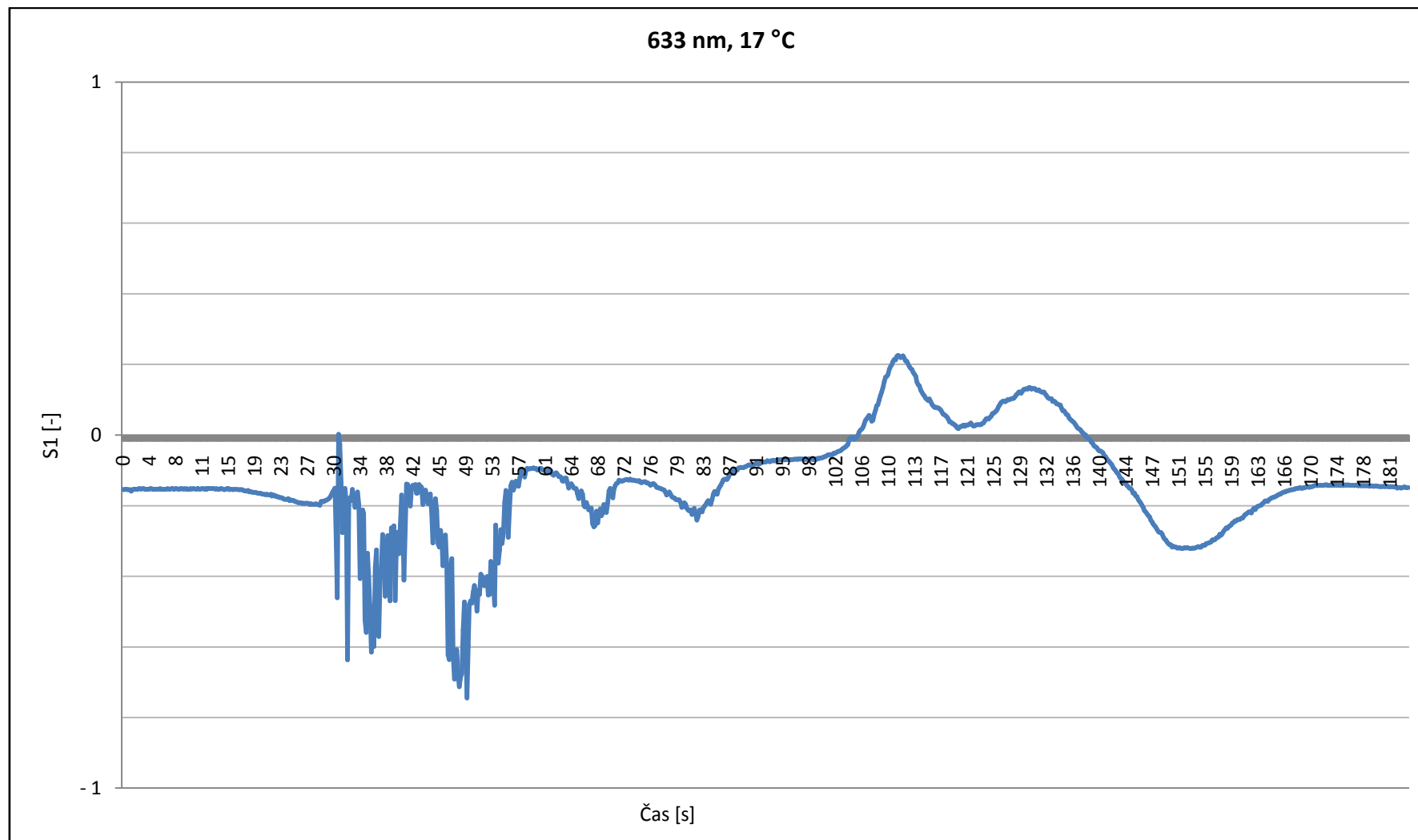
A.5 Závislost stupně polarizace na čase pro teplotu 27°C



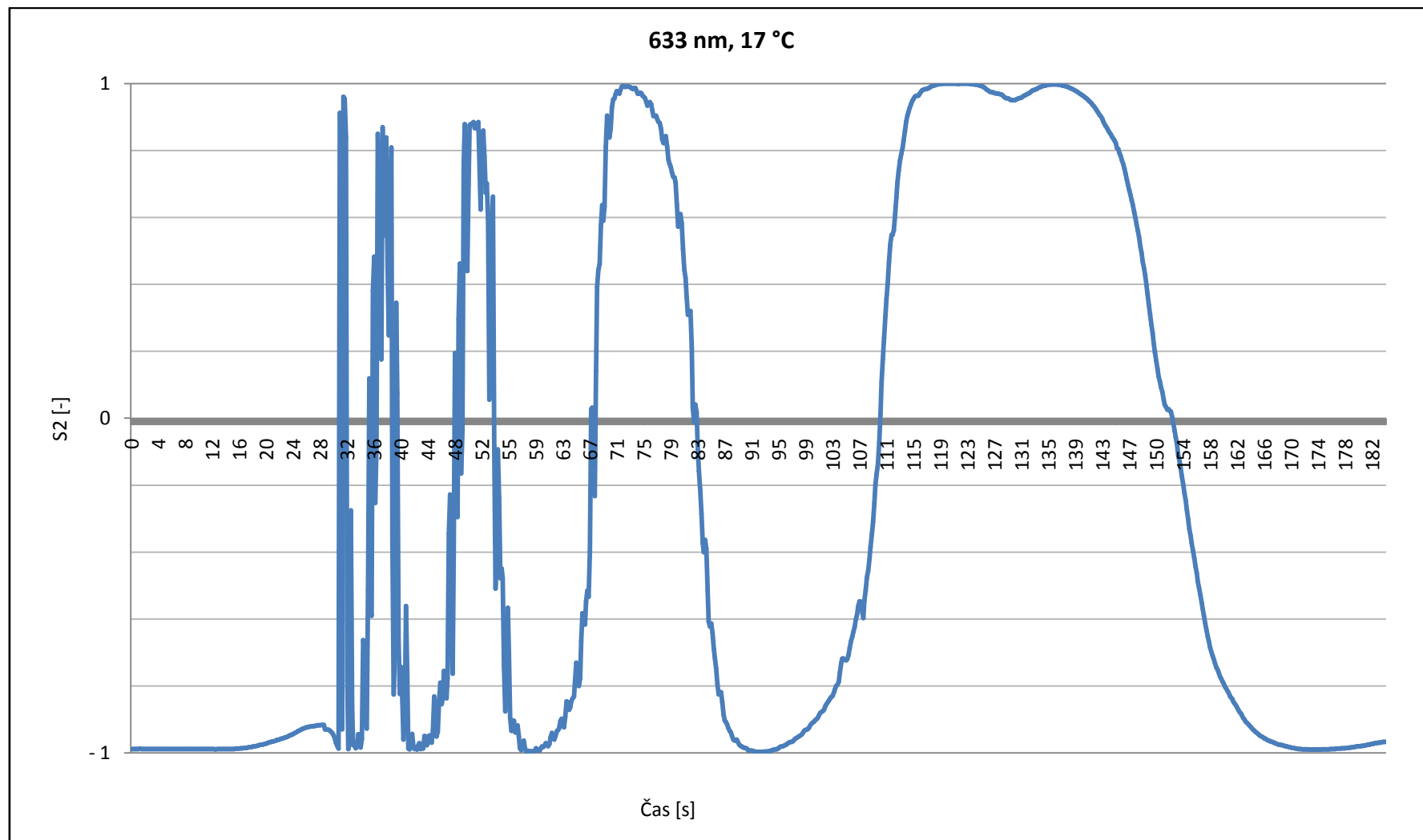
A.6 Závislost fázového posunu na čase pro teplotu 27°C



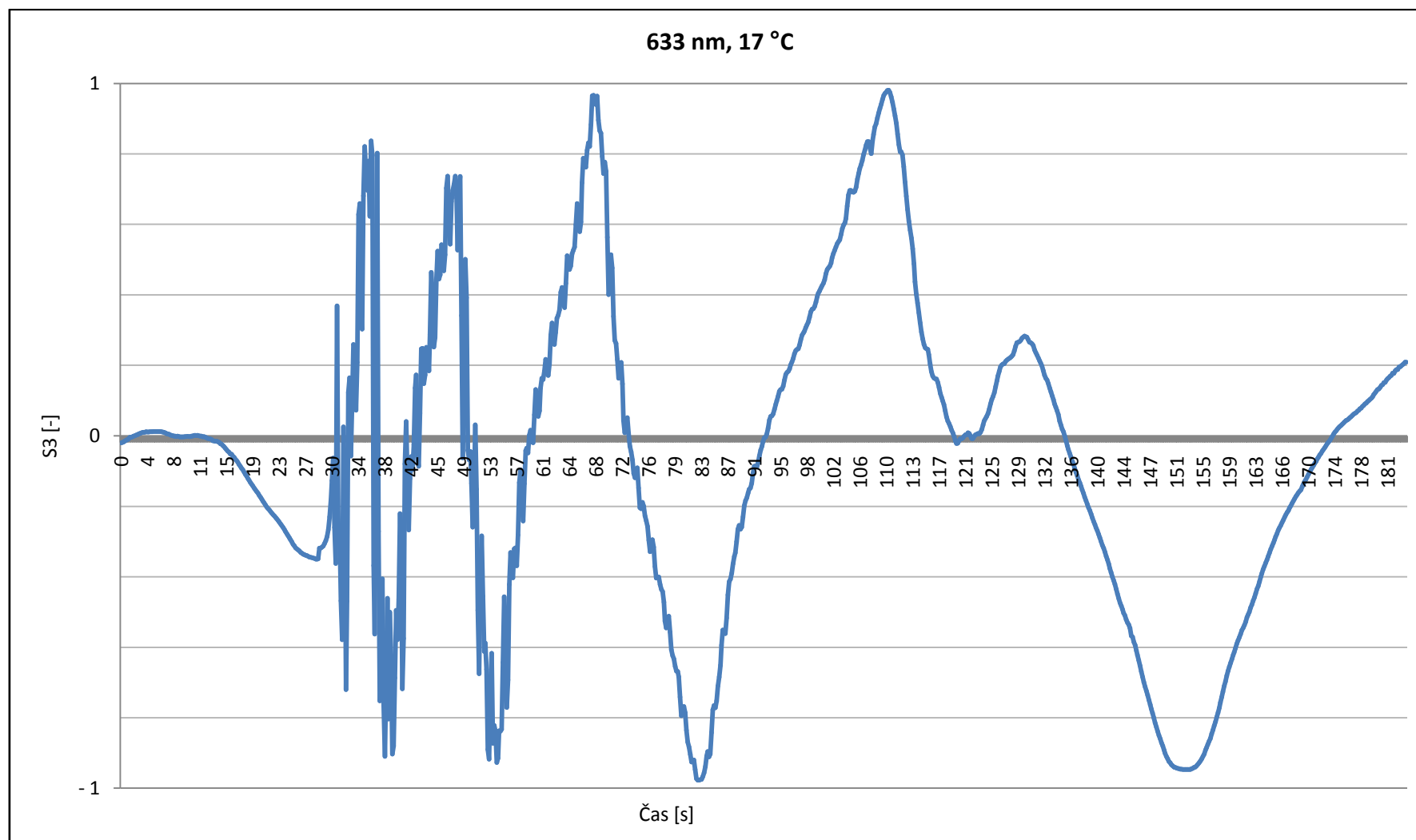
A.7 Závislost Stokes 1 na čase pro teplotu 17°C



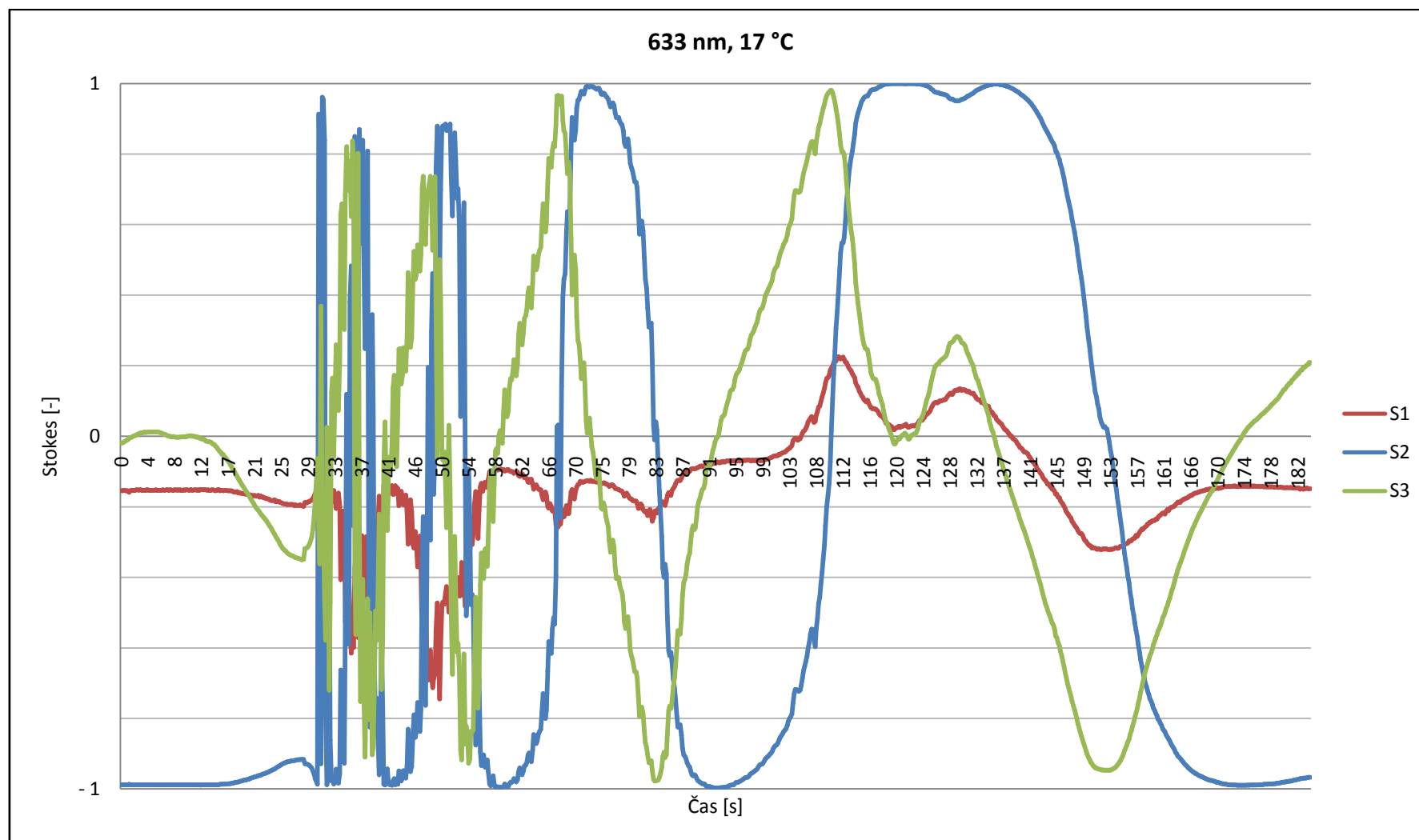
A.8 Závislost Stokes 2 na čase pro teplotu 17°C



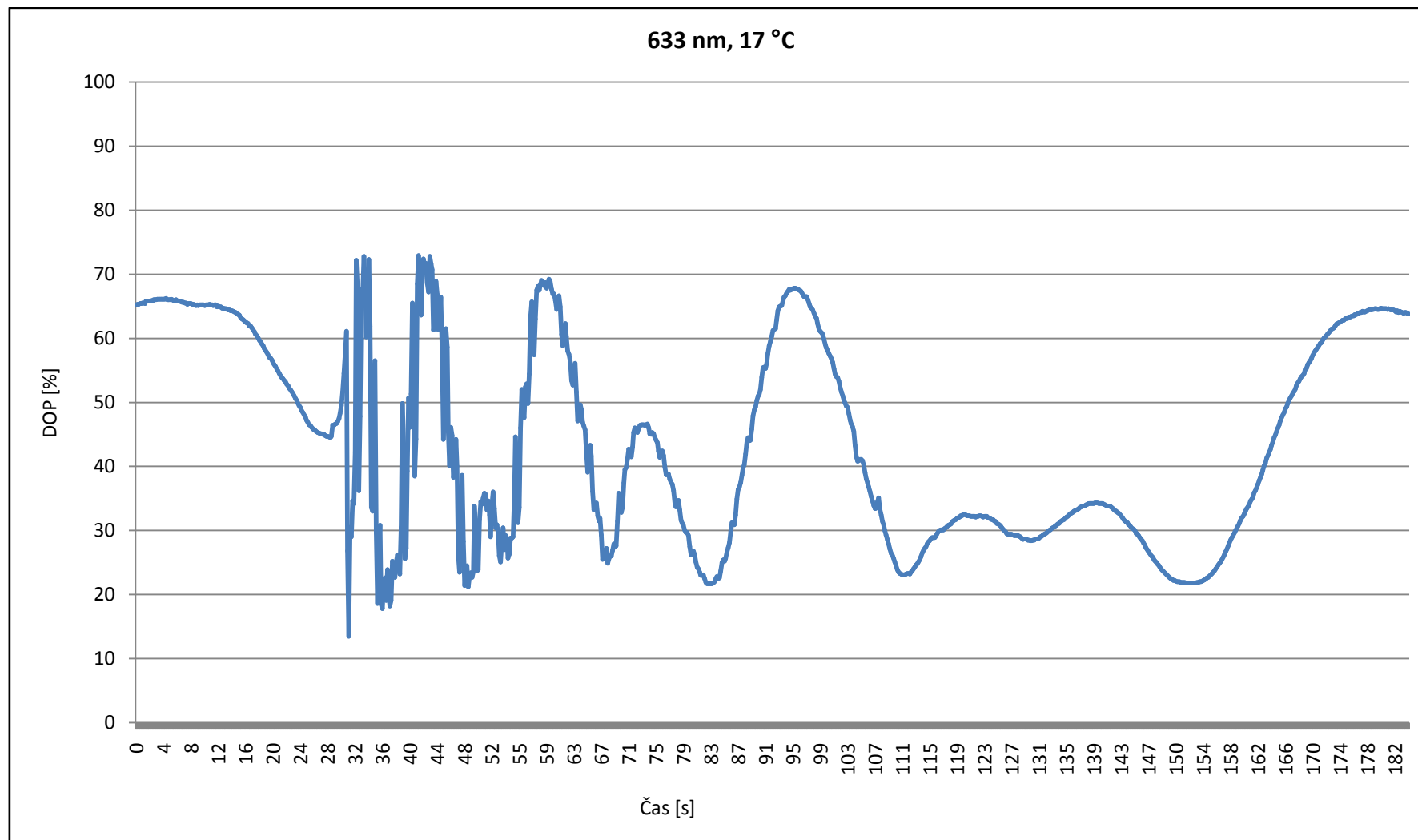
A.9 Závislost Stokes 3 na čase pro teplotu 17°C



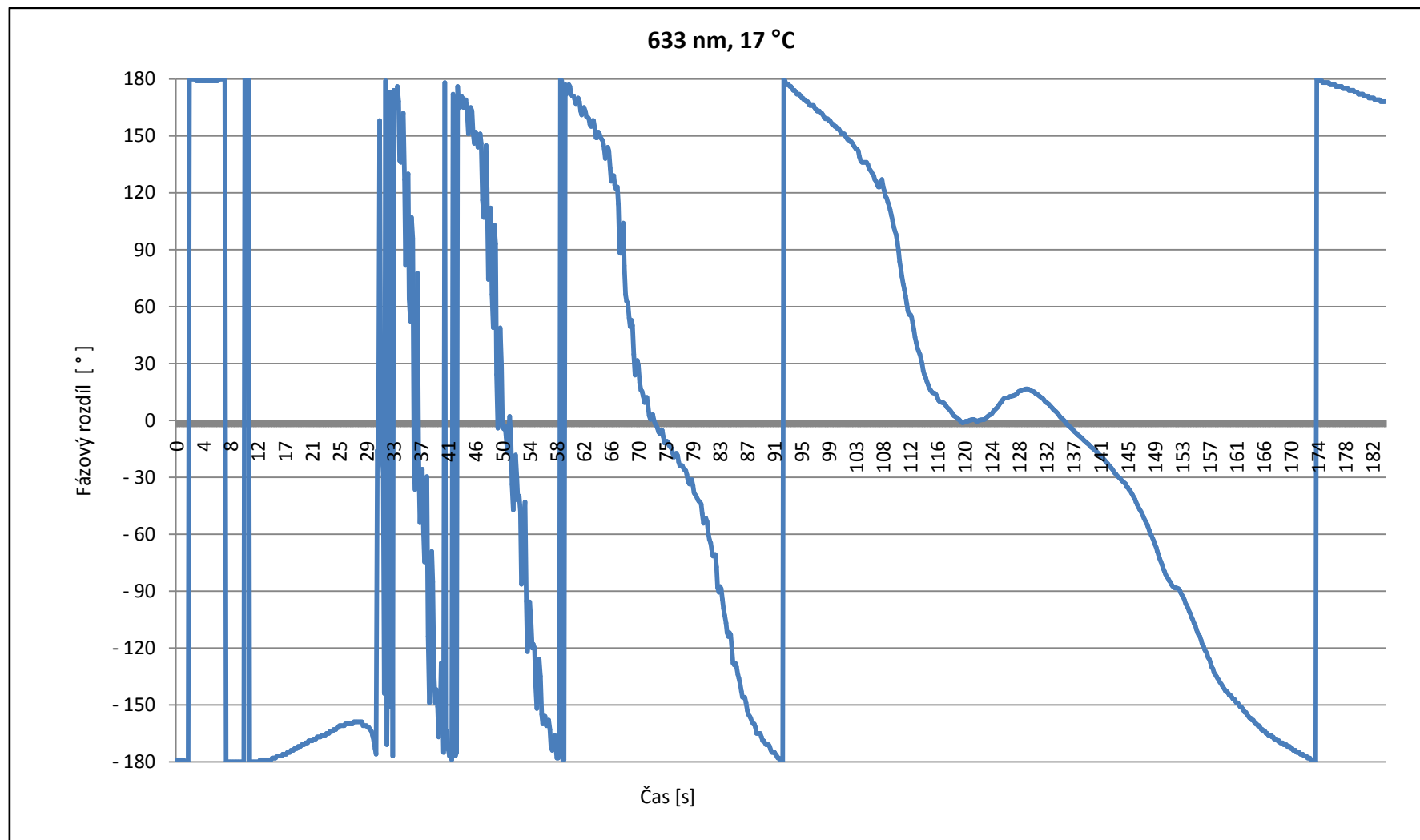
A.10 Závislost Stokes 1, 2 a 3 na čase pro teplotu 17°C



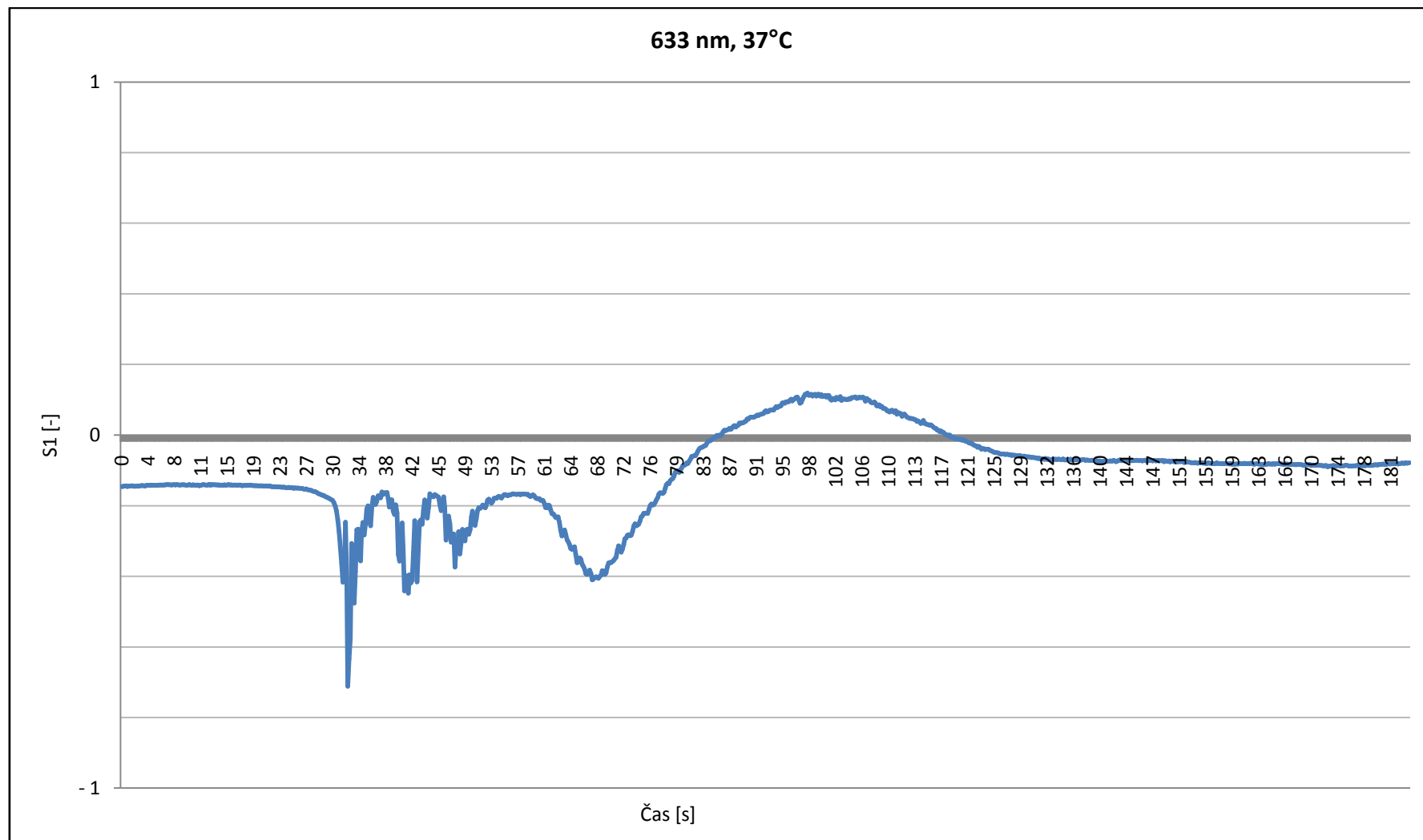
A.11 Závislost stupně polarizace na čase pro teplotu 17°C



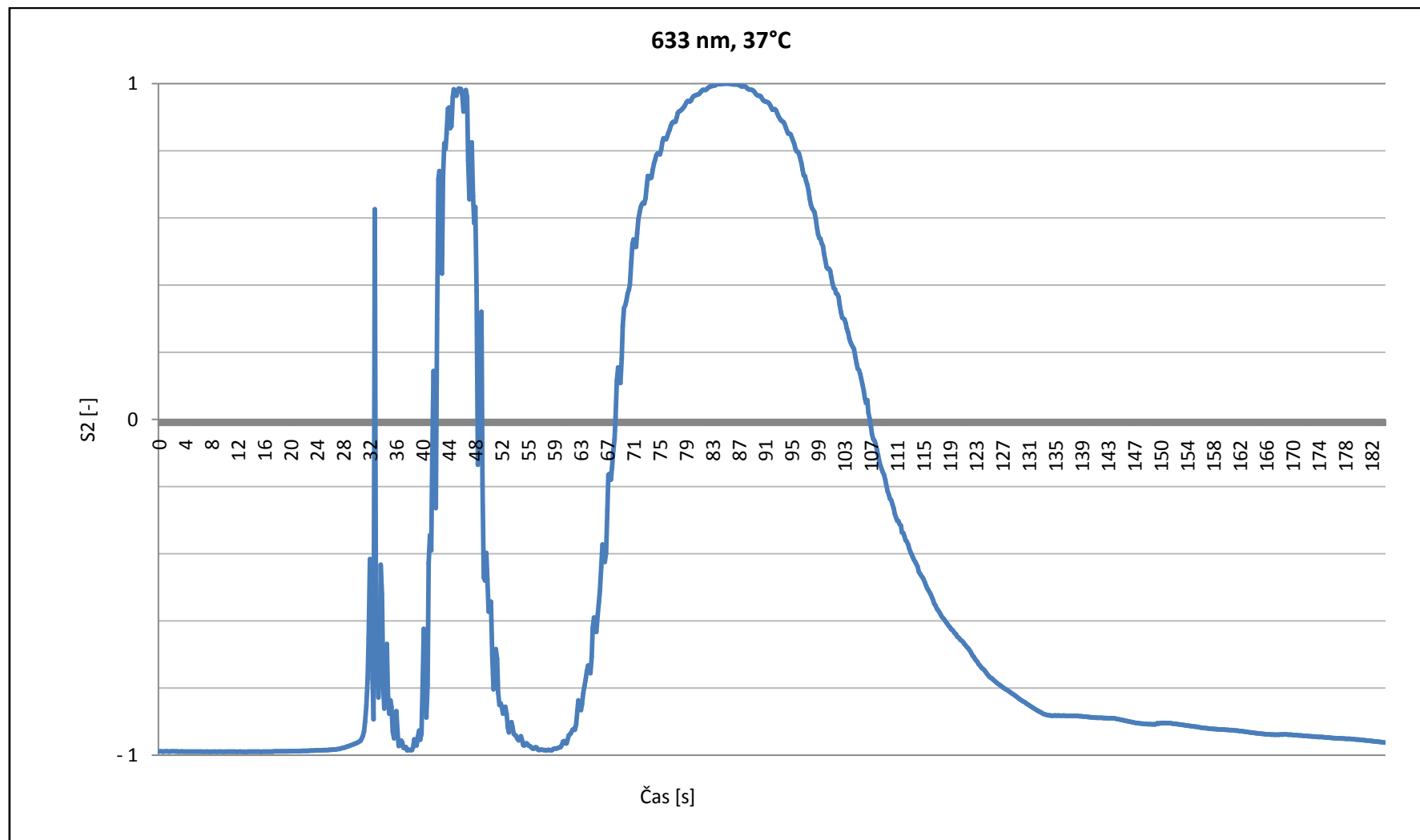
A.12 Závislost fázového posunu na čase pro teplotu 17°C



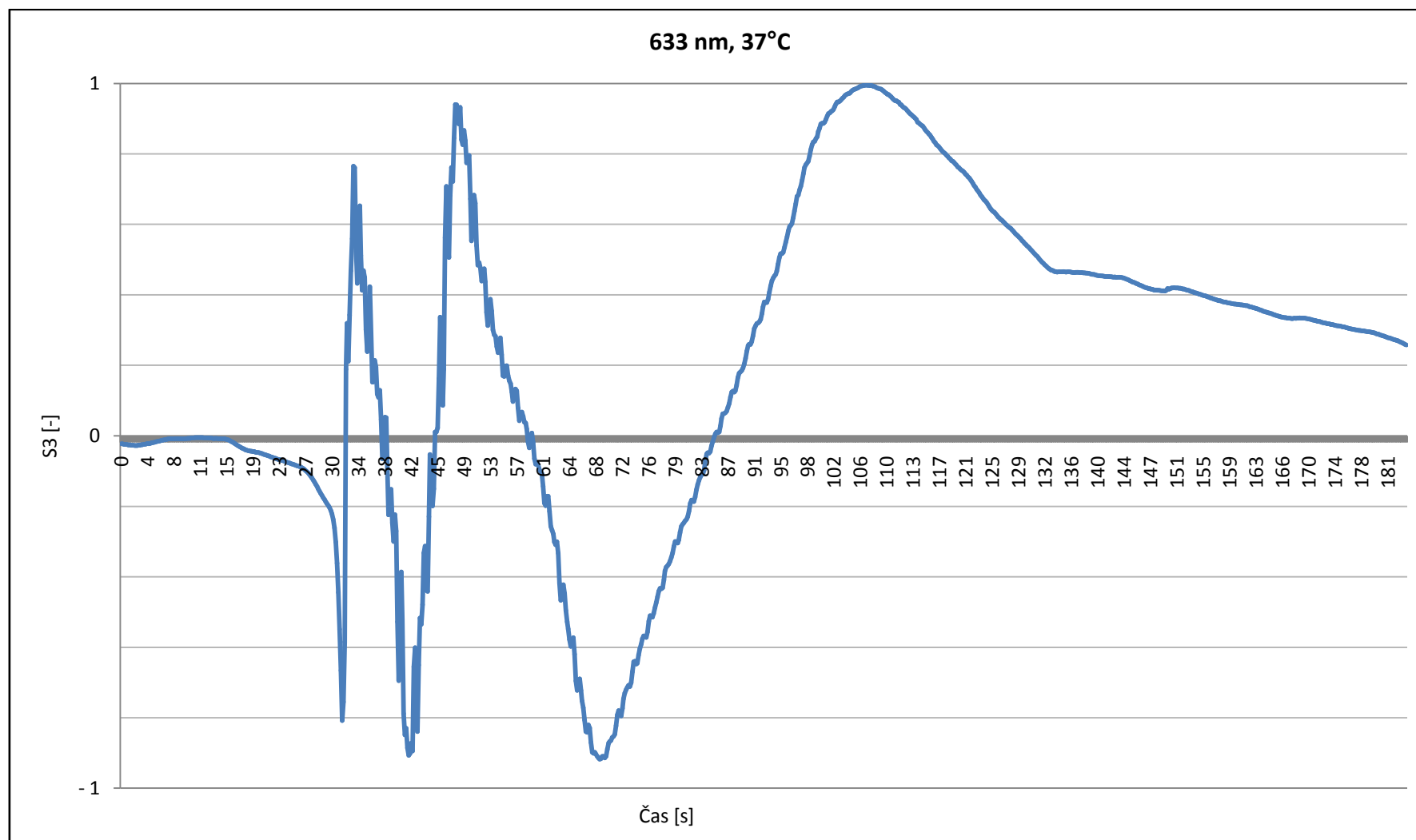
A.13 Závislost Stokes 1 na čase pro teplotu 37°C



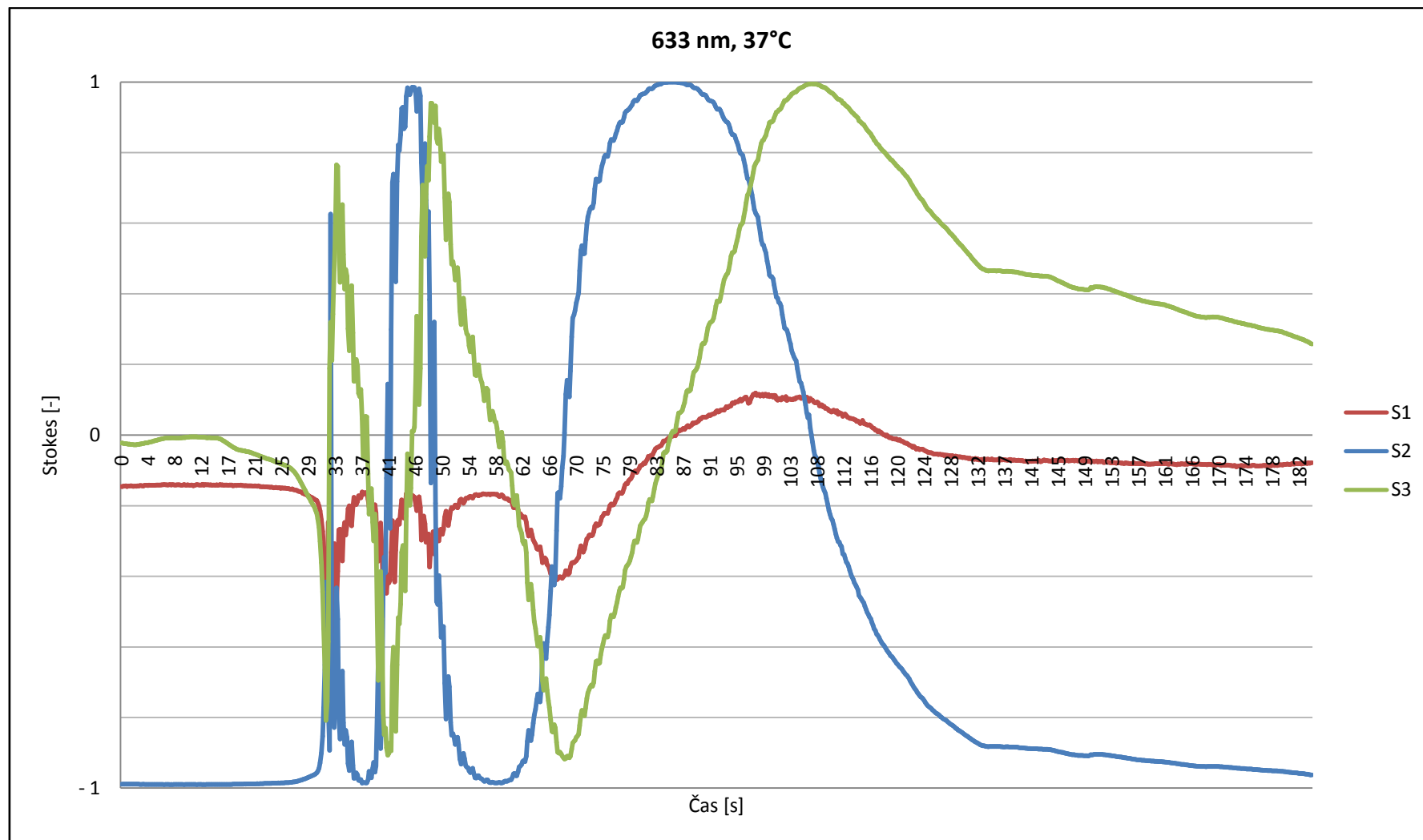
A.14 Závislost Stokes 2 na čase pro teplotu 37°C



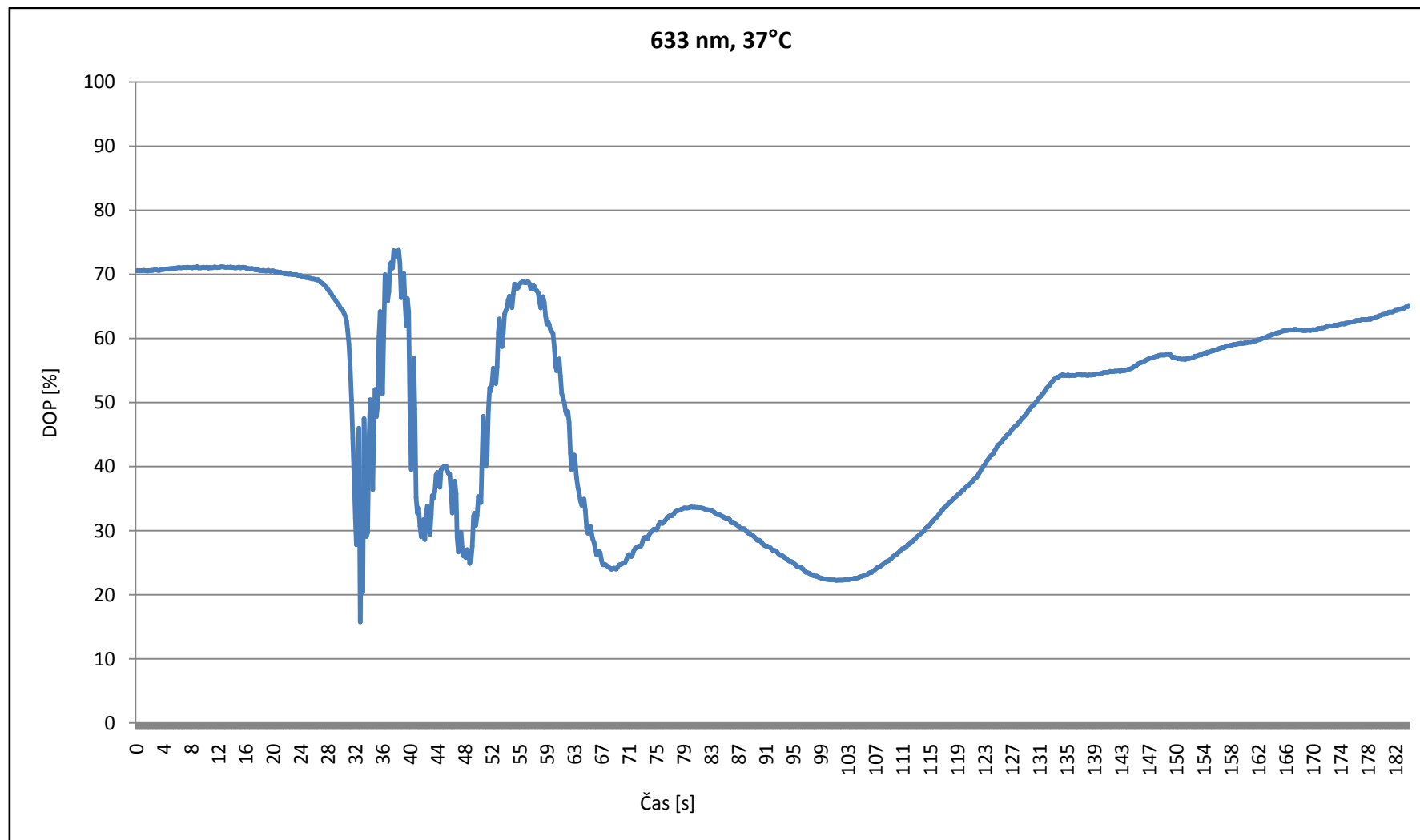
A.15 Závislost Stokes 3 na čase pro teplotu 37°C



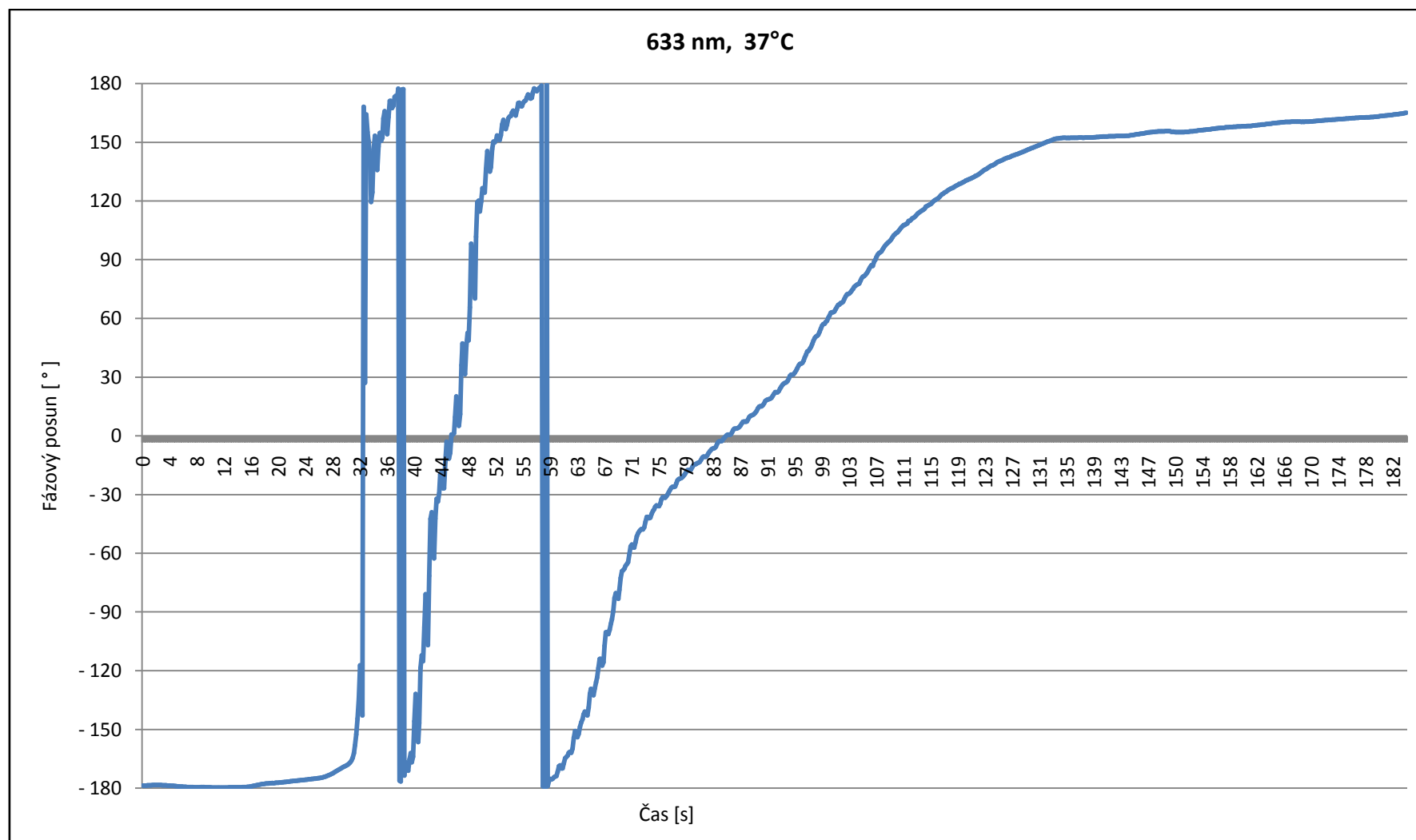
A.16 Závislost Stokes 1, 2 a 3 na čase pro teplotu 37°C



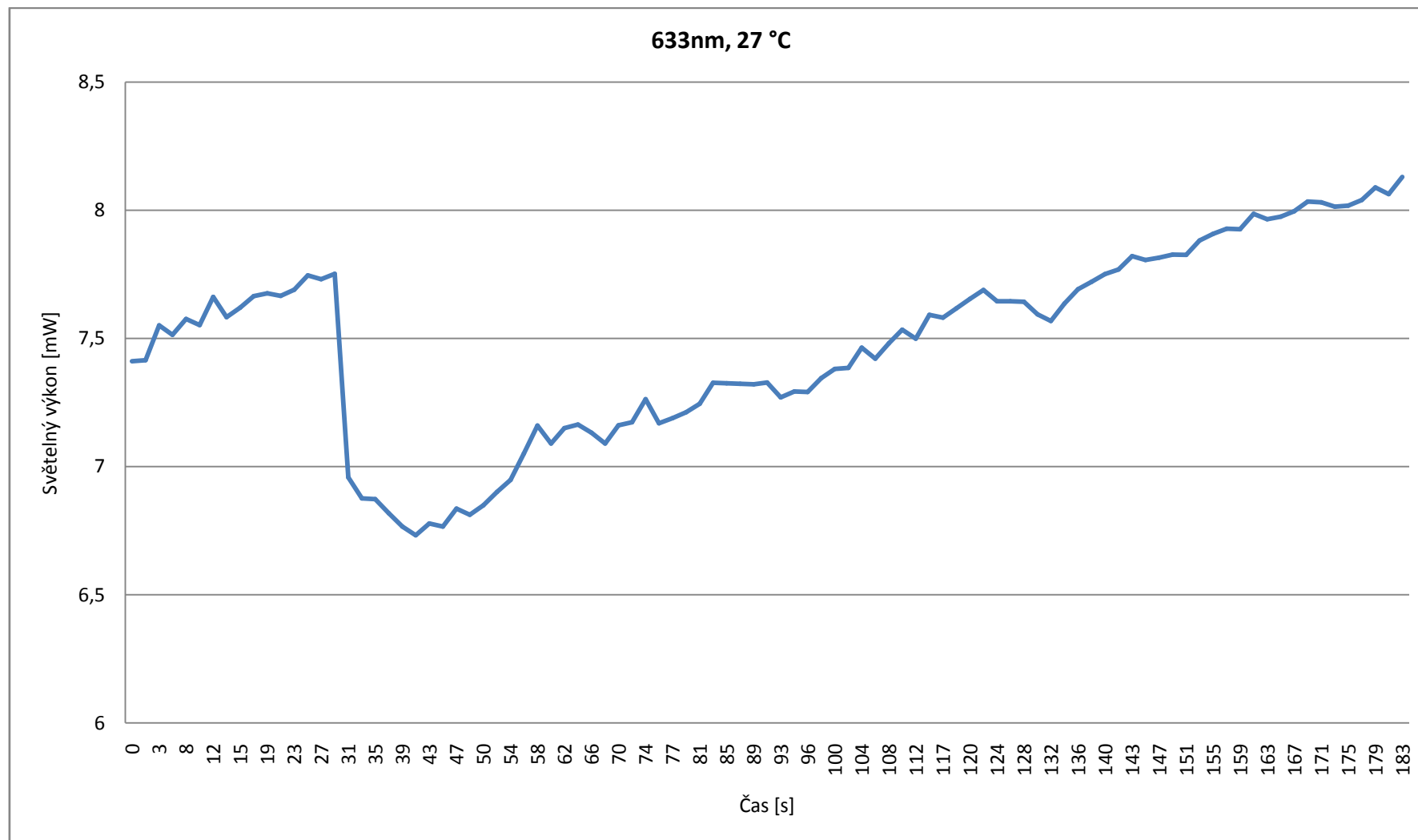
A.17 Závislost stupně polarizace na čase pro teplotu 37°C



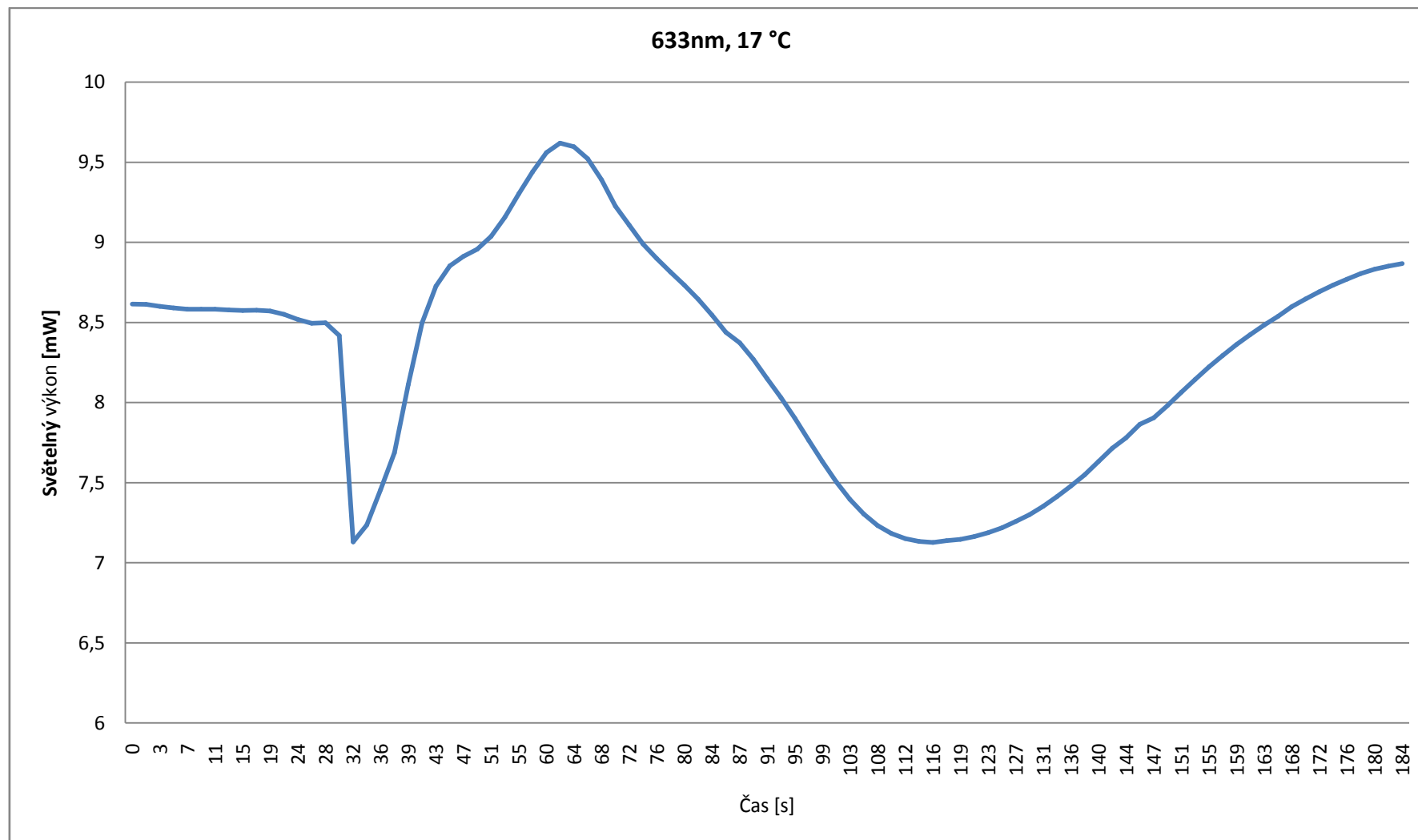
A.18 Závislost fázového posunu na čase pro teplotu 37°C



A.19 Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 27°C



A.20 Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 17°C



A.21 Závislost světelného výkonu na čase pro teplotu 37°C

